



The effect of waste PVC modified bitumen on the mechanical and physical properties of asphalt mixtures

Bekir Tuna Kayaalp^{1*}, Gaye Aydoğdu¹, Kader Yıldırım¹, Salih Serkan Artagan², İsmail Çağrı Görkem²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Eskişehir Technical University, 26555, Eskişehir, Türkiye

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Muğla Sıtkı Koçman University, 48000, Muğla, Türkiye

Highlights:

- Modification of bitumen with waste PVC
- Characterization of the modified bitumen using conventional test methods
- Determination of the Marshall flow, stability, and moisture susceptibility of mixtures prepared with the modified bitumen

Keywords:

- PVC waste
- Bitumen modification
- Hot mix asphalt
- Moisture susceptibility

Article Info:

Research Article

Received: 25.12.2024

Accepted: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1606998

Acknowledgement:

The authors would like to thank Dr. Fatma Birinci Kayaalp for her valuable support. The authors also acknowledge the financial support provided by the Eskişehir Technical University Scientific Research Commission under Project No. 23ADP145

Correspondence:

Author: Bekir Tuna Kayaalp
e-mail: btk@eskisehir.edu.tr
phone: +90 222 213 81 75

Graphical/Tabular Abstract

Asphalt remains the predominant pavement material due to its ease of repair, comfortable ride, and rapid production. Polyvinyl Chloride (PVC) is one of the world's most widely used plastics, employed across various industries. However, its widespread use contributes significantly to plastic waste pollution. To address this issue, this study investigates the potential of incorporating ground PVC waste (Figure A.1-2) as a binder modifier in hot mix asphalt (HMA) pavements. By recycling PVC, it is aimed at enhancing the properties of asphalt and reducing environmental impact. Bitumen samples were modified with 1%, 3%, and 5% PVC using a high-shear mixer (Figure A.3). Aggregate properties were assessed through sieve analysis, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, and soundness tests. In addition to specific gravity tests, conventional bitumen tests (penetration, softening point, and viscosity) were conducted on both base and modified bitumen. Optimum bitumen contents (OBC) were determined using the Marshall Mix Design (Figure A.4) procedure with the use of gyratory compactor instead of impact compactor. Conditioned and unconditioned specimens were manufactured with OBC to evaluate the impact of PVC modification on moisture susceptibility (Figure A.5). Results indicate that 1% and 3% PVC modifications offer several advantages such as reduced bitumen consumption, decreased temperature sensitivity of bitumen, increased softening point, higher indirect tensile stress and stability values, reduced moisture susceptibility of mixtures. These findings suggest that PVC modification holds promise as a sustainable solution to enhance the performance and durability of asphalt pavements while mitigating plastic waste.

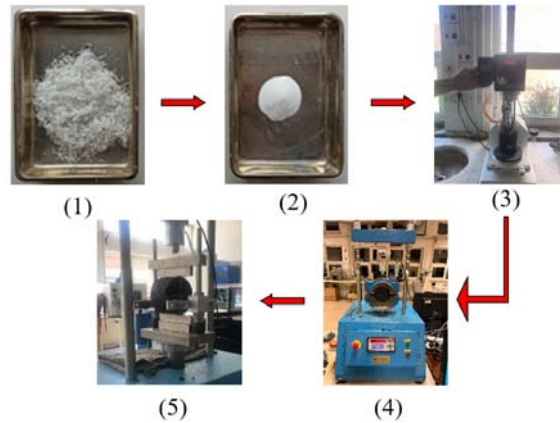


Figure A. Experimental procedure of the study

Purpose: Utilizing the PVC waste as a bitumen modifier in order to reduce the environmental impact

Theory and Methods: Conventional aggregate and bitumen test are conducted in order to assess the properties of the main components. OBC are defined for each type of mix and moisture susceptibility tests are conducted on conditioned and unconditioned specimens.

Results: %1 and %3 PVC modifications have increased stability, moisture resistance and ITS values while lowering the consumed bitumen. In addition, PI and softening point values are increased.

Conclusion: The incorporation of PVC as a bitumen modifier presents a promising approach to mitigating environmental concerns while improving the engineering properties of asphalt mixtures.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Atık PVC ile modifiye edilmiş bitümün asfalt karışımların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi

Bekir Tuna Kayaalp^{1*}, Gaye Aydoğdu¹, Kader Yıldırım¹, Salih Serkan Artagan², İsmail Çağrı Görkem²

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir, Türkiye

²Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Atık PVC ile bitümün modifikasyonu
- Modifiye edilmiş bitümün geleneksel yöntemlerle karakterizasyonu
- Modifiye edilmiş bitümle hazırlanan karışımların Marshall akma ve stabilite ve nem hasarına karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.12.2024

Kabul: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1606998

Anahtar Kelimeler:

Sıcak karışım asfalt,
atık PVC,
modifiye bitüm,
neme karşı hassasiyet

ÖZ

Asfalt kaplamalar, karayollarında en yaygın kullanılan kaplama tipi olup, esneklik, stabilite ve dayanıklılık gibi avantajlarıyla tercih edilmektedir. PVC yaygın kullanılan endüstriyel bir malzeme olup geri dönüştürülmesi zor ve zahmetli olduğu için çevre kirliliğinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, bitüm ağırlığınca farklı oranlarda (%1, %3 ve %5) atık PVC ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, malzeme özellikleri belirlenmiş, her bir katkı içeriğine ait karışım tipi için Marshall tasarımı yapılmış, akma ve stabilite değerleri belirlenmiştir. Ayrıca yine her katkı içeriği için indirekt çekme mukavemeti ve neme karşı hassasiyet deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, PVC katkısının bitümün viskozite değerlerini artırdığı ve bu artışa bağlı olarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, PVC modifikasyonu bitümün yumuşama noktasını yükseltmiş, asfalt karışımının sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığını da azaltmıştır. %1 ve %3 PVC modifikasyonlu karışımlar, stabilite ve dolaylı çekme dayanımı (ITS) gibi performans parametrelerinde en yüksek değerlere ulaşırken, %3 PVC içeren karışımın nem ve donma-çözülme döngülerine karşı üstün direnç gösterdiği tespit edilmiştir. PVC modifikasyonunun bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını azalttığı ve özellikle %3 PVC modifikasyonunun bitümün iklim değişikliklerine uygunluğunu artırdığı görülmüştür. Çalışma, atık PVC kullanımının asfaltın mekanik performansını iyileştirdiğini ve çevresel açıdan faydalı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

The effect of waste PVC modified bitumen on the mechanical and physical properties of asphalt mixtures

HIGHLIGHTS

- Modification of bitumen with waste PVC
- Characterization of the modified bitumen using conventional test methods
- Determination of the Marshall flow, stability, and moisture susceptibility of mixtures prepared with the modified bitumen

Article Info

Research Article

Received: 25.12.2024

Accepted: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1606998

Keywords:

Hot mix asphalt,
waste PVC,
modified bitumen,
moisture susceptibility

ABSTRACT

Asphalt pavements are the most widely used pavement type on highways due to advantages such as flexibility, stability, and durability. PVC is a commonly used industrial material, and because it is difficult and labor-intensive to recycle, it plays a significant role in increasing environmental pollution. In this study, the mechanical and physical properties of asphalt mixtures modified with different proportions (1%, 3%, and 5% by weight of bitumen) of waste PVC were investigated. Within this scope, basic material properties were determined, Marshall mix design was performed for each modification level, and the flow and stability values were obtained. In addition, indirect tensile strength (ITS) and moisture susceptibility tests were conducted for each mixture type. The results showed that the incorporation of PVC increased the viscosity of the bitumen, leading to higher mixing and compaction temperatures. PVC modification also increased the softening point of the bitumen and reduced the sensitivity of the asphalt mixture to temperature variations. Mixtures modified with 1% and 3% PVC achieved the highest performance values in terms of stability and ITS, while the mixture containing 3% PVC exhibited superior resistance to moisture damage and freeze-thaw cycles. It was observed that PVC modification reduced the temperature susceptibility of the bitumen, and that especially 3% PVC improved its suitability under varying climatic conditions. Overall, the study demonstrates that the use of waste PVC enhances the mechanical performance of asphalt and offers an environmentally beneficial solution.

1. Giriş (Introduction)

Asfalt kaplamalar yollarda en fazla tercih edilen kaplama tipidir. Tercih sebeplerinin başında stabilite, esneklik, sürüş konforu vb. özellikler yer almaktadır. Diğer kaplama tiplerine göre birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak ve istenilen özelliklerde bir kaplama üretebilmek için günümüzde birçok katkı maddesi kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri kaplamanın özelliklerini iyileştirilerek kaplamanın performansını güçlendirmektedir. Günümüzde katkı maddesi kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Asfalt karışımları belirli bir gradasyona sahip agregaya ile bitüm ve hava boşluğundan oluşmaktadır. Karışımındaki bitüm miktarı agregaya göre daha az olmasına rağmen kaplamanın performansına etkisi oldukça fazladır [1]. Bunun için kullanılan bitümün özellikleri iyileştirilerek asfalt karışımın performansı artırılabilir. Bitüm modifikasyonunda birçok katkı maddesi kullanılmaktadır. Katkı maddeleri olarak Elastomer ve Plastomer bazı polimerler (SBS, EVA, EBA, vb.), Öğütülmüş araç lastiği, Gilsonit, Bor atığı, PVC (Polivinil Klorür) ve atık yağlar kullanılabilmektedir. Bunlardan SBS en yaygın olarak kullanılan katkı maddesidir [2]. SBS katkı ilavesiyle sıcaklık ve trafik gibi çevresel faktörler etkisi ile oluşan deformasyonlar azaltılabilmektedir [1].

Dünya üzerinde gün geçtikçe evsel ve endüstriyel atık miktarlarında artış meydana gelmektedir. Bu atıkların çeşitli alanlarda değerlendirilerek geri dönüşümü sağlanabilmektedir [3-5]. Birçok alanda atık kullanımı yaygınlaştığı gibi yollarda da atık kullanımı yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda ülkemizde de atık maddelerin asfalt kaplamalarda kullanımında artış meydana gelmektedir. Atık maddelerin kullanımı hem doğaya katkı sağlamakta hem de kaplamaların performansı iyileştirilebilmektedir. PVC asfalt kaplamalarda kullanılan katkı maddelerinden biridir [6]. Polietilen (PE) ve polipropilenden (PP) sonra dünyada en çok üretilen üçüncü sentetik plastik polimerdir. PVC, yapı sektörü, ambalaj sanayisi, tıbbi malzeme üretimi ve otomotiv sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır [4].

Asfalt kaplamalarda PVC kullanımı ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Fakhri ve ekibi yaptıkları çalışma ile üç farklı yüzde (ağırlıkça %2, %3,5 ve %5 bitüm) iki tür geri dönüştürülmüş PVC'nin taş mastik asfalt karışımının mekanik özelliklerini iyileştirme etkisini araştırmıştır. Numuneler üzerinde Statik Sünme Testi, Dolaylı Çekme Dayanımı Testi (ITS), Yarı Dairesel Eğilme Testi (SCB) ve geleneksel bitüm deneyleri yapılmıştır. PVC kullanımının bitümün yumuşama noktasını, viskozitesini ve özgül ağırlığını artırdığı görülmüştür. Taş mastik asfaltta dolaylı çekme mukavemetinin iyileştiği ve neme karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir [6]. Ziari ve ekibi çalışmalarında elektrik ark ocağı tozu (EAFD) ve atık PVC malzemelerin asfalt bağlayıcılar ve karışımların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi araştırmıştır. EAFD ve PVC modifiyeli asfalt bağlayıcıların kimyasal özellikleri, mikro yapısal karakteristikleri, yorulma ömrü ve tekerlek izi direnci sırasıyla FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi), SEM (Taramalı elektron mikroskobu), LAS (Lineer genlik tarama testi) ve MSCR (Çoklu gerilme sonrası sünme-elastik geri dönme) testleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda eklenen katkı maddelerinin nem duyarlılığını ve yaşlanma direncini iyileştirdiği görülmüştür. MSCR test sonuçları ile yüksek gerilme seviyelerinde tekerlek izi direncini artırdığını göstermiştir [7]. Behl vd. %3 ve %5 oranlarda PVC kullanmışlardır. PVC-bitüm karışımının viskoelastik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada ITS (Dolaylı çekme deneyi) testi, WTT (Tekerlek izi testi) ve Kiriş yorulma testi yapılmıştır. Sonuç olarak karışımın mukavemetinin ve kalıcı deformasyona karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir [8]. Kazim vd. yaptıkları çalışmada

SBS, PTFE, PVC ve SBS+PVC polimerlerini kullanmışlardır. Numuneler üzerinde dönel viskozimetre ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Bitümün polimerlerle modifikasyonu viskozite gibi geleneksel özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Tekerlek izi deneyleriyle ölçülen mekanik özelliklerin polimer içeriğinin artmasıyla iyileştiği görülmüştür [9]. Murana vd. PVC'nin üretilen asfalt karışımın mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla çalışmalar yapmıştır. Sıcak karışım asfalt üretiminde Marshall karışım tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektrometrisi (EDS) incelemeleri yapılmıştır. Sonuç olarak %10 PVC kullanımı ile Marshall stabilitesinde 9,57 kN luk bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca modifiye bitüm kullanımı ile agregaların birbirine kenetlenmesinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir [10]. Tayh vd. çalışmalarında evsel atıklardan elde edilen geri dönüştürülmüş PVC ve PS (Polistriyen) dahil olmak üzere geri dönüştürülmüş polimer malzemelerin sıcak karışım asfalta dahil edilmesinin etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmada, polimer modifiyeli asfalt bağlayıcıların yumuşama noktası, penetrasyon, süneklik, dolaylı çekme dayanımı, Marshall stabilitesi ve neme duyarlılık gibi fiziksel testler uygulanmıştır. Sonuçlar %4'lük optimum içerikli geri dönüştürülmüş polimerlerin eklenmesinin daha düşük penetrasyon değerlerine ve daha yüksek yumuşama noktası sıcaklıklarına yol açtığını ve sıcaklık değişimlerine karşı daha iyi direnç ortaya koyduğunu göstermiştir. PVC ve PS modifiyeli karışımlar için Marshall stabilitesinde sırasıyla %43,7 ve %37,4 oranında, ve yine aynı karışımlar için dolaylı çekme dayanımında sırasıyla %32,2 ve %29,7 oranında artışlar sağlandığı tespit edilmiştir [11]. Pangestika vd. yaptıkları çalışma ile asfalt performansını ve yol dayanıklılığını artırmak için asfalt karışımlarında plastik kullanımının etkilerini araştırmışlardır. PET (Polietilen Tereftalat), HDPE (Yüksek yoğunluklu Polietilen), LDPE (Düşük yoğunluklu Polietilen), PVC, PP ve PS (Polistriyen) dahil olmak üzere çeşitli plastik türleri asfaltı modifiye etmek amacıyla kullanılmıştır. Kuru ve ıslak karışım olarak numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Plastik kullanımının numunelerin sertlik, tekerlek izi ve yorulma direnci gibi performans özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Homojen bir karışım elde etmek için maksimum plastik parçacık boyutunun 5 mm olduğu tespit edilmiştir. PVC içeren asfalt karışımların ıslak yöntem kullanılarak karıştırılması gerektiği görülmüştür [12]. Kumar ve arkadaşları PET, HDPE ve PVC dahil olmak üzere atık plastiğin VG30 sınıfı bitümde katkı maddesi olarak kullanımını incelemiştir. Araştırmada özellikle Marshall stabilite testi olmak üzere optimum performans elde etmek için plastiklerin oranlarına odaklanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda özellikle %100 PET ile %3 atık lastik içeriğinin ve %5,5 bitüm içeriğinin en yüksek stabilite değerini verdiği ve saf bitüme göre %73,07'lik bir iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca %5,5 bitüm içeriği çeşitli parametrelerde sürekli olarak üstün performans göstermiştir [13]. Köfteci ve ekibi üç tip atık PVC ile modifiye edilmiş bitümün reolojik davranışlarını incelemiştir. %2, %4, ve %6 olmak üzere üç farklı oranda PVC kullanılmıştır. Saf ve modifiye bitümün reolojik özellikleri, geleneksel ve dönel viskozite testleri ile Dinamik Kesme Reometresi testleri ile incelenmiştir. Tüm modifiye bağlayıcıların özellikle düşük açılal frekanslarda Newton akışkanı gibi davrandığı gözlenmiştir. PVC modifikasyonunun bitüm üzerinde bir sertleştirme meydana getirdiği tespit edilmiştir. Ancak tüm trafik hızlarında daha yüksek bir kompleks modül ve daha düşük bir faz açısı sağladığı görülmüştür. %4'ten fazla oranda yapılan modifikasyonun bitümün işlenebilirliğini azalttığı gözlemlenmiştir [14]. Ezzat vd. elastomer polimer olarak SBS (Strien-Butadien-Strien) ve plastomer polimer olarak PVC (Polivinil Klorür) kullanımının asfalt bağlayıcının performans sınıfına etkisini ve asfalt kaplamada meydana gelen deformasyonları incelemiştir. Çalışmada saf ve %2 SBS modifiyeli asfalta %2 ve %4 PVC katılmıştır. Elde edilen

sonuçlara göre saf asfalt bağlayıcının performans sınıfının, %2 SBS ile modifiye edilmiş asfalta sırasıyla %2 ve %4 PVC eklendiğinde üç ve dört derece arttığı görülmüştür. Saf asfalta sırasıyla %2 ve %4 PVC eklendiğinde bir ve iki derece arttığı ancak saf bağlayıcıya %2 SBS eklendiğinde iki derece arttığı görülmüştür. Ayrıca polimer tiplerinin yüzdelilerindeki artış ile asfaltın viskozitesinin arttığı tespit edilmiştir [15]. Xiao vd. yaptıkları çalışma ile atık plastik içeren kaplamanın karışımında kullanılan agregaların yüzey enerji bileşenleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. HDPE, LDPE, PET, PVC VE PP gibi farklı plastik türlerinin etkilerini karşılaştırmıştır. Bağlayıcı olarak PG 64-22 ve PG 76-22 bitümleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre atık plastiklerin asfalt ile uyumluluğu sırasıyla HDPE, PP, LDPE, PVC VE PET olarak belirlenmiştir. Ayrıca atık plastik kullanımı ile bitümün agrega yapışma özelliğinde artış meydana geldiği görülmüştür [16]. Alsaleh vd. bu çalışmada asfalt karışımların üretiminde hammadde olarak geri kazanılmış asfalt kaplamaların (RAP) kullanımının uygunluğunu araştırmıştır. Ayrıca PET ve PVC olmak üzere iki tip atık katkı maddesi kullanmışlardır. Bu katkı maddeleri kuru ve ıslak karıştırma yöntemleri kullanılarak eklenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda %3 RAP kullanımının optimum oran olduğu tespit edilmiştir. Islak karışım yöntemine göre saf asfaltın en uygun katkı maddesi oranları %7,5 PET ve %7,5 PVC'dir. Islak karışım yöntemine göre RAP karışımlarına PVC eklendiğinde stabilitede %25'e kadar artış olduğu sonucu elde edilmiştir [17]. Salman vd. asfalt karışımlarda kullanılan PVC'nin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışma yapmıştır. Bitümün ağırlıkça %2,5, %5, %7,5, %10, %12 ve %15 PVC ile karıştırılmasıyla bitümün özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Her bir yüzde için penetrasyon, yumuşama noktası, yanma ve parlama, düktilite ve ısıtma kaybı deneyleri yapılmıştır. %15 PVC eklendiğinde penetrasyonun %62,8 azaldığı sonucuna varılmıştır. PVC oranı arttığında sünekliliğin düştüğü görülmüştür. PVC oranı artırıldığında parlama noktası %23 oranında, yanma noktası ise %22 oranında azalmıştır [18]. Abed ve ekibi polimerlerin modifiye edilmiş asfalt karışımların üzerindeki etkilerini doğrudan belirlemek istemiştir. Bunun için doğrudan çekme testi (DDT) kullanılmıştır. SBS ve SBS-PVC modifiyeli iki tip karışım hazırlanmıştır. SBS katkı maddesinin asfalt karışımın hem sertliğini hem de çekme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. %6 SBS karışımı için en yüksek enerji eğilimi verildiğinde en iyi reolojik davranışları gösterdiği tespit edilmiştir. SBS ve PVC karışımında ise PVC asfalt karışımın tokluğunu bozduğu sonucuna varılmıştır [19].

Bu çalışmanın amacı, atık PVC kullanımının asfaltın mekanik performansını iyileştirme potansiyelini incelemek ve çevresel açıdan faydalı bir çözüm sunup sunmadığını değerlendirmektir. Çalışma, PVC modifikasyonunun asfalt karışımlarındaki etkilerini analiz ederek, sürdürülebilir yol yapımı için bu tür modifikasyonların uygulanabilirliğini ortaya koymayı hedeflemektedir. Çalışmada, farklı oranlarda (%1, %3 ve %5) atık PVC ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle agregası, modifiye ve saf bitümün temel özellikleri geleneksel geleneksel deney yöntemleri ile belirlenmiştir. Sonrasında optimum bitüm içeriği Marshall tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Ardından saf ve modifiye bitümle hazırlanmış karışımların dolaylı çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve neme karşı hassasiyetleri incelenmiştir.

2. Malzeme ve Metod (Materials and Method)

2.1. Bitüm (Bitumen)

Çalışmada TÜPRAŞ Kırıkkale rafinerisinden sağlanmış 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda kullanılan PVC (Şekil 1) pencere imalatı esnasında ortaya çıkan PVC talaşının öğütülmesi yöntemiyle elde edilmiştir. Kullanılan PVC talaşı

ve öğütülmüş PVC tozuna ait görsel ve fiziksel özellikler sırasıyla Şekil 1'de ve Tablo 1'de verilmiştir. PVC katkısının bitüm modifikasyonunda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda modifikasyon sıcaklığı genellikle 160-190°C aralığında, karıştırma hızının ise 1000-2000 devir/dakika aralığında tercih edilmiştir [6, 11, 14, 18]. Çalışma kapsamında bitüm, elektrikli ısıtıcı üstüne yerleştirilmiş, sıcaklığı sürekli olarak 175-180°C'de tutulan bir beher içinde 1500 devir/dakika hızda dönen bir yüksek kesme hızlı karıştırıcı yordamıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında 90 dakika süresince karıştırılarak modifiye edilmiştir. Modifikasyon düzeneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. PVC talaşı ve öğütülmüş PVC (PVC sawdust and ground PVC)

Tablo 1. Modifikasyonda kullanılan PVC'nin özellikleri (Properties of PVC used for modification)

Özellik	Değer
Görünüm	İnce-Beyaz toz
Kimyasal bileşim	C ₂ H ₃ Cl
Nem ve uçuculuk (%)	<%0,4
Yoğunluk (gr/cm ³)	0,5
Plastifiyan emilimi (%)	>85
Kalsinasyon kalıntısı (%)	<%0,04
0,250 mm toz kalıntısı (%)	<1
0,063 mm toz kalıntısı (%)	>95
Vinil klorid kalıntısı (ppm)	<1
Beyazlık (%)	>74



Şekil 2. Bitüm modifikasyon düzeneği (Bitumen modification setup)

Saf ve modifiye edilmiş bitümlerin özgül ağırlıkları belirlenmiş ve geleneksel kabul edilen penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri gerçekleştirilmiştir [20].

ASTM D5 standardında tanımlanan penetrasyon deneyi 25°C'deki bitüm numunesine, üzerine 100 gr ağırlık bağlanmış bir iğnenin serbest olarak bırakılmasından 5 saniye sonra bitüm içerisinde gidebildiği mesafenin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Bitüm sınıflandırmasında kullanılan en yaygın deneydir [21]. Bitümün belirli bir erime sıcaklığı olmadığından sıcaklık ve şekil değiştirme ilişkisi ASTM D36'da tanımlanan yumuşama noktası deneyi ile belirlenir [22]. Pratikte hava sıcaklıklarının arttığı durumlarda bitümün şeklini koruyup koruyamayacağına dair temel bir fikir sunar. Ayrıca, bahsi geçen her iki geleneksel deneyden türetilmiş olan Penetrasyon indeksi ise bitümün sıcaklık değişimine olan duyarlılığının belirlenmesinde kullanılır. Penetrasyon indeksinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı Eş. 1'de verilmiştir [23]. Bu değerin -2'den küçük olması bitümün sıcaklık değişimlerine karşı fazla duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması durumunda ise sıcaklık değişimlerine karşı az duyarlı olduğunu ifade etmektedir [1, 24].

P: 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değeri / T: Yumuşama noktası sıcaklık değeri

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log P - 20 \times T}{50 \times \log P - T - 120} \quad (1)$$

Bir diğer geleneksel bitüm deneyi olan viskozite deneyi ise bitümün akışkanlığını tespit etmek için kullanılır. Karıştırma işleminde, bitüm ve agreganın homojen şekilde karışıp kenetlenmesi ve sıkıştırma işleminin optimum enerji ile yeterli miktarda yapılması akışkanlık değerine bağlıdır [25]. ASTM D 6926 standardına göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla 170±20 cP ve 280±30 cP olmalıdır. Viskozite değerinin belirlenmesi yaygın kullanılan standartlarda genellikle dönel viskozite ve Saybolt viskozitesi olmak üzere iki farklı yöntemle tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında bitümün viskozitesi pratik ve tekrarlanabilirliğinin kolay olması sebebiyle ASTM 4402 standardına [26] uygun olarak Brookfield DVIIIX+Pro dönel viskozimetresi ile tespit edilmiştir (Şekil 3). Dönel viskozimetre cihazı, dönen bir milin ekseninde yer alan bir tork sensörünün algıladığı karşıt tork değerinin elde edilmesi prensibine dayanır. Değiştirilebilir başlıklara sahip olmasına rağmen ölçüm aralığı görece dardır ve ölçüm yapılan kabın çapına ve dönüş hızı değişikliğine karşı hassastır. Kullanılacak başlık tipi, ölçüm kabı gibi değerler bitüm için standardize edilmemişse de bitüm viskozitesi ölçümünde kullanılan Brookfield viskozimetreleri için genellikle 27 numaralı başlık ve 20 devir/dakika hız tercih edilmektedir [27, 28]. Bu çalışmada da bahsedilen başlık ve dönüş hızı ile deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yaşlanma etkilerinin tespiti için de dönel ince film ısıtma kaybı deneyine (RTFOT) tabi tutulmuşlardır. RTFO testi sonrası elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Brookfield dönel viskozimetresi (Brookfield rotational viscometer)

2.2. Agregat (Aggregate)

Çalışma kapsamında kullanılan kalker agregası yerel bir taş ocağından temin edilmiştir. Agregat gradasyonu Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) [25] Aşınma tabakası Tip-1 olarak tanımlanan agregat dağılımı sınırlarının içinde olacak şekilde seçilmiştir. Şartnamedeki elek aralıklarının kullanılabilmesi için elek analizi ASTM C136 [29] standardına göre üretilmiş elek seti ile yapılmıştır. Kaba agreganın özgül ağırlığı ASTM C127 [30], ince ve filler agreganın özgül ağırlıkları ASTM C128 [31] standartlarına göre belirlenmiştir. Agreganın yük altında aşınma direnci, Los Angeles aşınma direnci testi olarak da bilinen ASTM C535 [32] standardına göre yapılmıştır. Donma-çözülme direnci kimyasal yöntemle (MgSO₄) ASTM C88 [33] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Agregat deneylerine ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Çalışmada saf ve modifiye edilmiş bitümlerin standarda uygun olacak şekilde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiş ardından karışım tasarımı yapıp optimum bitüm içeriği tespit edilmiştir. Optimum bitüm içeriklerine göre üretilen numunelere ASTM D4867 – Asfalt karışımlarında neme karşı hassasiyet testi uygulanmıştır.

Tablo 1. B 50/70 saf bitüm için geleneksel deney sonuçları (Conventional test results for B 50/70 base bitumen)

Deney	Standart	Sonuçlar				Sınır değerler
		Saf	%1PVC	%3PVC	%5PVC	
Özgül ağırlık (gr/cm ³)		1,035	1,016	0,994	0,990	-
Penetrasyon (25°C'de, 0,1 mm)	ASTM D5	57	37	32	29	50-70
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	50,20	55,90	65,40	65,60	≥40
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-0,85	-0,51	0,99	0,81	-2 – 2
Viskozite (135°C'de, cP)	ASTM D4402	570,0	615	900	802,5	-
Viskozite (165°C'de, cP)	ASTM D4402	117,5	165	205	182,5	-

Tablo 2. RTFOT sonrası bitüm özellikleri (Properties of the bitumen after RTFOT)

Deney	Standart	Sonuçlar			
		Saf	%1PVC	%3PVC	%5PVC
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0,48	0,52	0,49	0,40
Penetrasyon (25°C'de, 0,1 mm)	ASTM D5	49	24	30	23
Kalıcı Penetrasyon (%)	-	86	65	94	69
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	53,30	61,0	64,9	62,2
Yumuşama nok. değişimi (°C)	-	6,2	5,1	-0,9	-3,4

Tablo 3. Agrega özellikleri (Aggregate specifications)

Deney	Standart	Sonuçlar	Sınır değerler
Elek numarası	ASTM C136		
3/4"		100	100
1/2"		94	88-100
3/8"		81	72-90
No 4		47	42-52
No 10		30	25-35
No 40		15	10-20
No 80		10,5	7-14
No 200		5,5	3-8
Özgül ağırlık (Kaba)	ASTMC127		
Kuru (gr/cm ³)		2,711	-
Suya doygun (gr/cm ³)		2,637	-
Zahiri (gr/cm ³)		2,745	-
Özgül ağırlık (İnce)	ASTM C128		
Kuru (gr/cm ³)		2,673	-
Suya doygun (gr/cm ³)		2,708	-
Zahiri (gr/cm ³)		2,771	-
Özgül ağırlık (Filler) (gr/cm ³)	ASTM C128	2,605	-
Los Angeles Aşınma (%)	ASTM C535	25,16	<27
Donma-çözülme direnci (%)	ASTM C88	2,34	<6

2.3. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi (Determination of mixing and compaction temperatures)

KTŞ'de sıcak karışım asfaltlarda yeterli düzeyde agrega-bitüm aderansı sağlanabilmesi, serim ve sıkıştırma işlemlerinin optimum enerjiyle yeterli düzeyde yapılabilmesi için karıştırma ve sıkıştırma esnasında bitüm viskozitesinin sırasıyla 170±20 cP ve 280±30 cP değerlerinde olması gerektiği belirtilmiştir [25]. Saf ve modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespit edilebilmesi için bitümlerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri dönel viskozimetre yardımıyla tespit edilmiş ve elde edilen değerler ile sıcaklık-viskozite grafiği oluşturulmuştur. Bitümün viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi logaritmik eksenle doğrusal kabul edildiğinden bahsedilen değerler kullanılarak doğrusal bir denklem elde edilmiş ve bu denkleme bağlı olarak da ihtiyaç duyulan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları aralıkları tespit edilmiştir.

2.4. Karışım tasarımı (Mix Design)

Çalışmada Marshall tasarımı olarak bilinen Asphalt Institute tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu tasarım yöntemi; (i) Hava boşluğu oranı, (ii) Bitümle dolu boşluk oranı, (iii) Stabilitate değeri ve (iv) Pratik özgül ağırlık değerleri kullanılarak Optimum Bitüm İçeriği (OBİ) tespitine dayanmaktadır. Bu tespiti yapılabilmek için seçilen agrega gradasyonuna göre hazırlanmış 1150 gr'lık agrega ve %3,5-6,5 aralığında, %0,5 artışla 7 farklı oranda bitüm içeriği kullanılarak, her bir oran için en az 3 numune olacak şekilde toplam 21 adet numune karıştırılır ve sıkıştırılır. 24 saat uygun koşullarda soğutulup, dinlendirilen numunelerin fiziksel özellikleri belirlenir. Daha sonra 30-40 dakika 60°C sıcak su banyosunda kürlenir ve ardından Marshall stabilite ve akma cihazında 50 mm/dakika hızla yüklemeye tabi tutulurlar. Bu deney sonucunda her bir karışım numunesi için Marshall akma ve stabilite değerleri elde edilir.

Marshall karışım tasarımında bahsi geçen sıkıştırma işlemi tokmak ile tariflenmiştir. Ancak çalışmanın yürütüldüğü laboratuvar da yoğurmalı kompaktör bulunmaktadır. Marshall tasarımında numunelerin tamamı eşit sayıda darbe ile sıkıştırılmakta ve hava boşluğu değerleri bitüm içeriğinin değişmesiyle birlikte değişmektedir. Bu prensipten hareketle tasarım için üretilen numuneler eşit yoğurma sayısında sıkıştırılmak istenmiştir. Ancak

100 mm çaplı numuneler için darbe sayısı ile yoğurma sayısı arasında standardize edilmiş bir dönüşüm katsayısı henüz yoktur [34-37]. Bu amaçla yapılmış çalışmalarda ise tavsiye edilen yoğurma sayısı 30 ile 120 arasında değişmektedir [38-41]. Sıkıştırılmış karışımın hava boşluğunun tasarımı temel bir parametre olması ve bu değerlerin birbirlerinden uzak olması sebebiyle literatürde yer alan bir değer referans alınması pek mümkün olmamıştır. Dolayısı ile yoğurma sayısı çalışmada kullanılan karışıma göre ayrıca tespit edilmiştir.

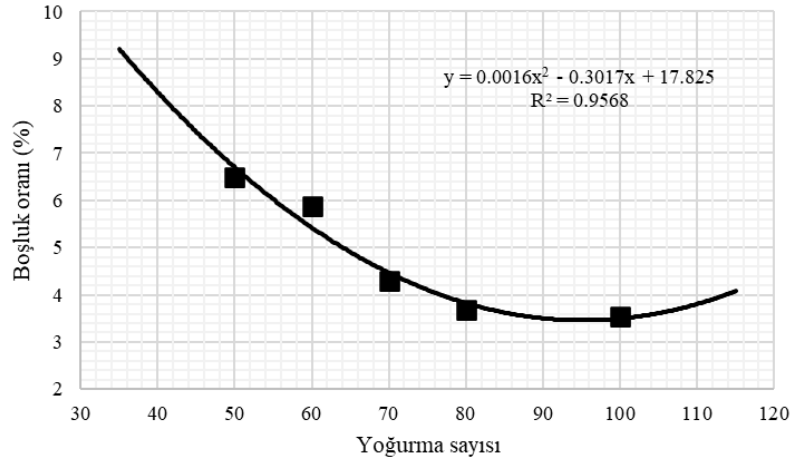
Sıkıştırma metodunun doğası gereği bu sayı agrega yüzey pürüzlülüğü, gradasyon tipi, sıcaklık ve dolayısı ile sıcaklığa bağlı olarak viskozite değeri, döküm esnasında oluşan segregasyon başta olmak üzere birçok parametreden etkilenmektedir. Çalışma kapsamında uygulanacak optimum yoğurma sayısının tespit edilebilmesi için yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk (VFA) ve hava boşlukları (V) oranları arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak üzere bir numune seti hazırlanmıştır. Yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfalt karışımlarda optimum bitüm oranları büyük çoğunlukla %5 civarındadır. Dolayısı ile bütün karışımlarda kullanılabilecek ortak bir yoğurma sayısı belirleyebilmek adına numuneler, 1150 gr'lık agrega ve %5 bitüm oranı için farklı yoğurma sayıları ile sıkıştırılmıştır. Yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk ve hava boşluğu oranları Tablo 4'te verilmiştir. Tablodaki verilere göre bir ampirik denklem elde edilmiş ve Marshall tasarımı için %4 boşluk oranı, neme karşı hassasiyet deneyi için %7 boşluk oranını sağlayan yoğurma sayıları sırasıyla 80 ve 45 olarak belirlenmiştir. Yoğurma sayısı ve boşluk oranı ilişkisi Şekil 4'te verilmiştir.

2.5. Neme karşı hassasiyet deneyi (Moisture susceptibility test)

Yağış etkilerinin agrega-bitüm aderansının bozulmasında etkili olduğu yapılan birçok çalışmada ifade edilmektedir [42-44]. Karışımın içine sızan su agrega-bitüm arasındaki kenetlenmeyi azaltarak soyulmaya neden olmaktadır. Soğuk hava şartlarında ise karışım içine sızan su donarak bu soyulma miktarını ve hızını arttırmaktadır [45, 46]. Soyulma mekanizmasının laboratuvar ortamında test edilmesi için çeşitli test yöntemleri geliştirmiştir. En yaygın olarak bilinen Modifiye Lottman deneyi AASHTO T283 standardında tanımlanmıştır. Bununla birlikte EN12697-12 ve ASTM D4867 standartları da benzer deneylerdir. Çalışma kapsamında ASTM D4867 [47] deney prosedürü izlenmiştir (Şekil 5).

Tablo 4. Yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk oranı ve hava boşluğu oranları (Number of Gyration, VMA and V_a percentages)

Numune No.	Bitüm Oranı (%)	Hacim %			VMA (%)	VFA (%)	Yoğ. sayısı
		Bitüm	Agrega	V_a			
1	5,0	11,06	82,62	6,32	17,38	63,62	50
2	5,0	11,11	82,24	6,66	17,76	62,53	
3	5,0	11,18	83,19	5,63	16,81	66,50	
4	5,0	11,19	82,68	6,14	17,32	64,58	60
5	5,0	11,38	84,26	4,37	15,74	72,25	
6	5,0	11,43	84,35	4,22	15,65	73,01	
7	5,0	11,43	84,62	3,95	15,38	74,32	80
8	5,0	11,71	84,85	3,44	15,15	77,32	
9	5,0	11,47	84,76	3,78	15,24	75,22	
10	5,0	11,61	85,06	3,33	14,94	77,72	100

**Şekil 4.** Yoğurma sayısı – boşluk oranı arasındaki ilişki (Relationship between gyration number and air voids)**Şekil 5.** ASTM D4867 deney prosedürü aşamaları; a) Yaşlandırma, b) Suya doygun hale getirme, c) Dondurma, d) Dolaylı çekme deneyi (ASTM D4867 experiment procedure a) Aging b) Saturation c) Freezing d) ITS test)

Önce 6 adet agrega-bitüm karışımı uygun karıştırma sıcaklığında karıştırılmış ve 2 saat gevşek formda sıkıştırma sıcaklığında etüvde kürlenmiştir. Daha sonra $\pm 1\%$ hava boşluğunda sıkıştırılmış ve soğumaya bırakılmıştır. 24 saat sonra fiziksel özellikleri belirlenmiş ve boşluk ortalamaları birbirine en yakın olacak şekilde iki gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki numuneler saf su dolu bir desikatöre yerleştirilmiş ve 70 kPa vakumla kısmi olarak (%55-80 arasında) suya doygun hale getirilmiştir. Donma-çözülme etkisini de tespit edebilmek amacıyla 15 saat boyunca -18°C de dondurulmuş, ardından sonunda 24 saat boyunca 60°C suda çözündürülmüştür. Bu sürecin

ardından koşullandırılmamış numunelerle birlikte 25°C sıcaklıktaki suda 1 saat dinlendirilerek numune sıcaklıkları eşitlenmiş ve dolaylı çekme deneyine hazır hale getirilmiştir. Marshall akma ve stabilite cihazına uyarlanmış dolaylı çekme deney başlığı kullanılarak 50 mm/dakika hızla yüklenen numunelerin taşıdığı maksimum yük tespit edilmiş ve Eş 2’de verilen bağıntı kullanılarak dolaylı çekme dayanımı (ITS) hesaplanmıştır. KTS’de bu deney için koşullandırılmış numunelerin ITS değerlerinin ortalamalarının, koşullandırılmamış numunelerin ortalama değerlerine oranının en az %80 olması gerektiği belirtilmiştir (TSR). Bu koşula ait bağıntı Eş. 3’te verilmiştir.

$$S_t = 2000 * P / \pi * t * D \quad (2)$$

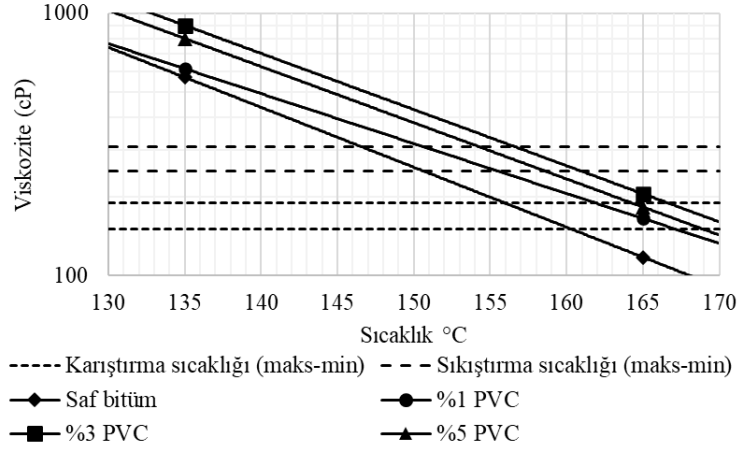
S_t : Çekme gerilmesi (kPa) / P : Maksimum yük (N) / t : Numune yüksekliği (mm) / D : Numune çapı (mm)

$$TSR = S_{tm} / S_{td} \quad (3)$$

TSR : Çekme gerilmesi oranı / S_{tm} : Koşullandırılmış numunelerin ITS değeri ortalaması / S_{td} : Koşullandırılmamış numunelerin ITS değeri ortalaması

3.1. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti (Determination of mixing and compaction temperatures)

Saf ve modifiye bitümler için sıcaklık-viskozite ilişkisi Şekil 6’da verilmiştir. 140 ve 200 cP aralığındaki bölge karıştırma, 250 ve 310 cP aralığındaki bölge ise sıkıştırma için uygun viskozite aralıklarını



Şekil 6. Saf ve modifiye bitümler için sıcaklık-viskozite ilişkisi (Temperature-Viscosity relationship for base and modified bitumens)

göstermektedir. Saf ve modifiye bitüm için tespit edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları için alt ve üst sınırlar Tablo 5'te verilmiştir. %1 ve %3 PVC katkılı bitümler için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları artmıştır. %5 PVC katkılı bitüm için ise karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %3 PVC katkılı bitüme göre düşmüştür.

Tablo 5. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları (Mixing and compaction temperatures)

	Karıştırma sıcaklığı aralıkları °C (min-maks)	Sıkıştırma sıcaklığı aralıkları °C (min-maks)
Saf bitüm	156-160	147-151
%1 PVC	164-167	151-155
%3 PVC	167-171	157-161
%5 PVC	164-168	154-158

3.2. Karışım deneyleri (Mixture design)

KTŞ'de aşınma Tip-1 asfalt betonu için hava boşluğu oranının %3-5 aralığında, bitümle dolu boşluk oranının %65-75 aralığında stabilite değerinin en az 900 kgf ve akma değerinin 2-4 mm aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Tasarım parametreleri şartnamede verilmiş aralıkların ortalama değerleri olarak kabul edilmiştir. Dolayısı ile %4 boşluk oranı ve %70 bitümle dolu boşluk oranına göre tasarım yapılmıştır. Pratik özgül ağırlık (PÖA) ve stabilite değerleri için ise elde edilen grafiklerden maksimum değerler belirlenmiştir. Tasarım yönteminde bu dört farklı değer ortalama OBİ olarak kabul edilmektedir. Saf ve modifiye edilmiş üç bitüm tipi için OBİ değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Elde edilen Marshall tasarım değerlerinin sadeleştirilmiş olarak Tablo 6-Tablo 9'da, elde edilen grafikler Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Saf bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri (Simplified design values for base bitumen)

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,5	57,87	5,88	2,46	1482	2,20
4,0	67,65	4,42	2,48	1584	2,50
4,5	79,02	2,77	2,50	1698	2,50
5,0	84,22	2,16	2,50	1719	3,10
5,5	88,34	1,66	2,50	1557	3,00
6,0	88,58	1,75	2,48	1218	4,70
6,5	90,05	1,61	2,46	994	5,30

Tablo 7. %1 PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri (Simplified design values for %1 PVC modified bitumen)

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,5	62,90	4,90	2,48	1642	2,30
4,0	74,35	3,43	2,50	1699	2,20
4,5	86,29	2,20	2,53	1769	2,90
5,0	93,25	1,44	2,53	1667	3,00
5,5	96,27	1,30	2,52	1654	4,10
6,0	97,44	1,00	2,51	1319	5,20
6,5	97,20	0,69	2,49	1272	6,50

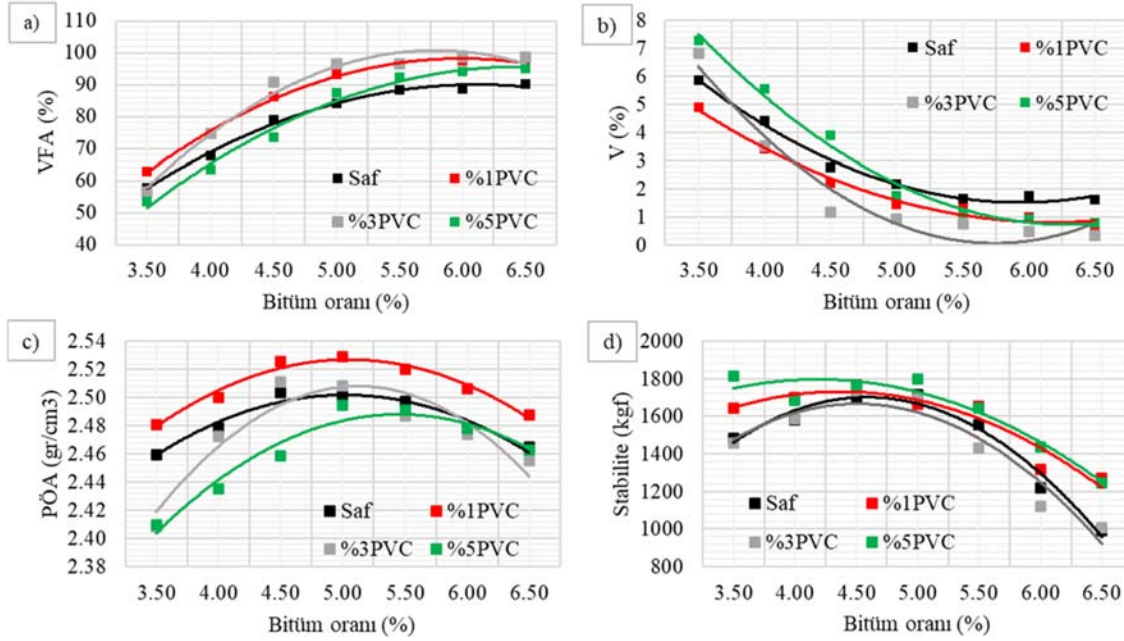
Tablo 8. %3 PVC Katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değeri (Simplified design values for %3 PVC modified bitumen)

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,5	56,42	6,83	2,41	1460	3,2
4,0	74,62	3,53	2,47	1586	3,6
4,5	90,85	1,18	2,51	1731	3,8
5,0	96,46	0,92	2,51	1696	4,3
5,5	96,51	0,75	2,49	1434	4,5
6,0	98,53	0,47	2,47	1121	6,0
6,5	98,77	0,33	2,46	1009	6,4

Tablo 9. %5 PVC Katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değeri (Simplified design values for %5 PVC modified bitumen)

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,5	53,38	7,30	2,41	1814	3,1
4,0	63,37	5,55	2,44	1683	3,5
4,5	73,60	3,91	2,46	1768	3,9
5,0	87,44	1,75	2,49	1799	4,3
5,5	92,23	1,12	2,49	1646	4,7
6,0	94,00	0,92	2,48	1437	6,2
6,5	95,09	0,80	2,46	1247	6,4

Tasarım değerleri – bitüm içeriği ilişkisi elde edilmiş (Şekil 7), bulunan değerlerin ortalamaları alınarak her bir karışım tipi için optimum bitüm içeriği tespit edilmiştir (Tablo 10). Elde edilen optimum bitüm içeriklerine göre yeniden karışımlar hazırlanmış ve tekrar akma ve stabilite testine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen akma ve stabilite değerleri Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 7. Saf ve modifiye bitüm için Marshall tasarımına ait; a) Hava boşluğu, b) Bitümle dolu boşluk oranı, c) Pratik özgül ağırlık, d) Stabilite grafikleri (a) Air voids, b) VFA c) Specific gravity d) Stability graphs for Marshall design of base and modified bitumen)

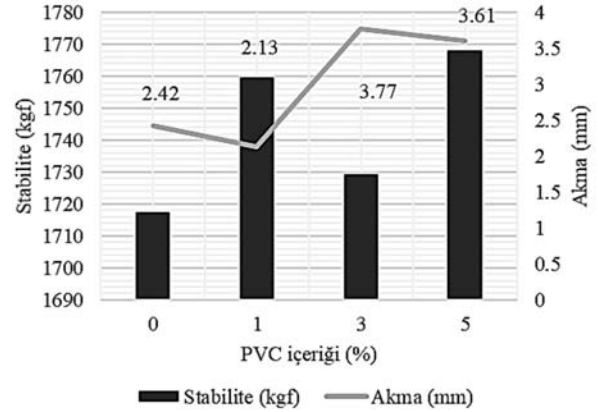
Şekil 7c incelendiğinde, %1 PVC modifikasyonlu bitümle hazırlanan pratik özgül ağırlık değerlerine sahip olduğu sonraki en yüksek değerlerin saf bitümlü karışımda elde edildiği görülmektedir. %3 PVC ve %5 PVC modifikasyonu ile üretilmiş karışımlarda pratik özgül ağırlık değeri sırasıyla azalmıştır. Şekil 7d incelendiğinde, sırasıyla %5 PVC ve %1 PVC modifikasyonu ile hazırlanmış karışımlarda stabilite değerleri maksimum olmuştur. Saf ve %3 PVC modifikasyonlu bitümle hazırlanmış karışımlarda ise stabilite değerleri daha düşük elde edilmiştir ve birbirlerine çok yakındır. Tablo 10 incelendiğinde, %1 ve %3 PVC modifikasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanmış karışımlarda OBİ'nin %2 azaldığı %5 PVC modifikasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanmış karışımlarda ise OBİ'nin neredeyse değişmediği görülmektedir. Şekil 8'de OBİ'lere göre üretilen asfalt karışımların ilgili şartname koşullarını sağladığı görülmektedir.

Tablo 10. Optimum Bitüm İçerikleri (Optimum bitumen contents)

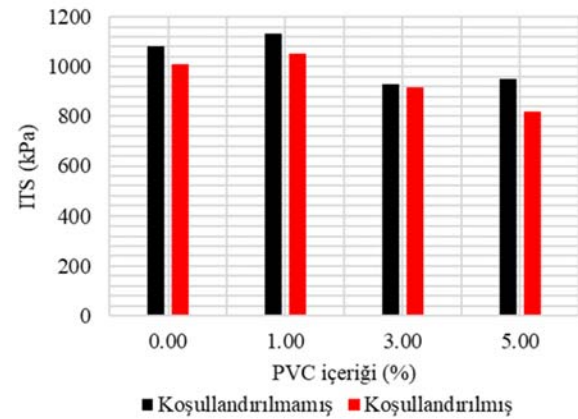
	Saf bitüm	%1 PVC	%3 PVC	%5 PVC
VFA (%)	4,34	3,96	3,84	4,19
V (%)	4,11	3,86	3,95	4,35
PÖA (gr/cm ³)	5,08	5,15	5,13	5,13
Stabilite (kgf)	4,58	4,35	4,50	4,50
OBİ (%)	4,53	4,33	4,36	4,54

3.3. Neme karşı hassasiyet deneyleri (Moisture susceptibility tests)

ASTM D4867 prosedürüne göre test edilen koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelere ait sonuçlar Şekil 9'de sunulmuştur. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin tamamı standartta verilen 5 kg/cm² (~490 kPa) değerinin fazlasıyla üzerindedir [25]. %0, %1, %3 ve %5 PVC ile modifiye edilmiş bitümle üretilen numunelerin TSR değerleri sırasıyla %94, %93, %98 ve %86 olmuştur. Suya doygun hale getirildikten sonra donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmış numunelerin, koşullandırılmamış numunelere oranı bütün gruplar için KTŞ sınırı olan %80 in üzerindedir.



Şekil 8. OBİ'ye göre üretilen numunelerin akma ve stabilite değerleri (Stability and flow values of the mixtures prepared with OBC)



Şekil 9. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerleri (ITS values of conditioned and unconditioned specimens)

4. Simgeler (Symbols)

AASHTO	: Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
cP	: Santipoaz (Viskozite Birimi)
DDT	: Doğrudan Çekme Deneyi
EAFD	: Elektrik Ark Ocağı Tozu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FTIR	: Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
ITS	: Dolaylı Çekme Dayanımı
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
OBİ / OBC	: Optimum Bitüm İçeriği
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PI	: Penetrasyon İndeksi
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVC	: Polivinil Klorür
PÖA	: Pratik Özgül Ağırlık
RAP	: Geri Kazanılmış Asfalt Kaplaması
RTFOT	: Dönel İnce Film Fırını Yaşlandırma Deneyi
SBS	: Stiren-Bütadien-Stiren
SCB	: Yarı Dairesel Eğilme Deneyi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
Va / V	: Hava Boşluğu
VFA	: Bitümle Dolu Boşluk Oranı
VMA	: Mineral Agrega Boşlukları
WTT	: Tekerlek İzi Deneyi

5. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışma kapsamında, yukarıda verilen yöntemler ve bu yöntemlerden elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Atık PVC'den elde edilen PVC tozu ile modifiye edilmiş bitümlerin viskozite değerleri artmıştır. Dolayısı ile ihtiyaç duyulan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da yükselmiştir. Bununla beraber modifiye bitümlerin yumuşama noktaları da yükselmiştir. Dolayısı ile PVC modifikasyonu asfalt karışımlarda bitümün sıcaklık değişimine karşı duyarlılığını azaltmış olacaktır.
- PVC modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri saf bitümden daha yüksektir. Bu durum PVC modifikasyonunun bitümün sıcaklığa karşı olan duyarlılığını azaltmıştır. %3 PVC modifiyeli bitümde ise penetrasyon indeksi maksimum olmuştur. PVC modifikasyonu aynı bitümün farklı iklimlerde kullanılabilirliğini genişletmiştir.
- RTFO deneyi sonucunda gerçekleşen kütle kaybı %1 PVC modifiye bitüm için artmışken %3 PVC modifikasyonunda saf bitümle aynı seviyeye gelmiş ve %5 PVC modifikasyonlu bitümde ise %17 azalmıştır. Buna bağlı olarak, %5 PVC modifiyeli bitüm kullanımının asfalt üretimi ve nakliyesi esnasında gerçekleşen kısa dönem yaşanmaya bağlı etkilerin azaltabileceği düşünülmektedir.
- Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, sıkıştırma sıcaklıkları PVC içeriği arttıkça artarken, karıştırma sıcaklıkları incelendiğinde %3 katkı içeren örneklerde önemsiz bir oranda düşmüş, sonrasında yeniden artmıştır. Bunun nedeni olarak karıştırma sıcaklıklarının sıkıştırma sıcaklıklarından daha yüksek olması düşünülebilir. %3 içerikle hazırlanan PVC katkı maddeli bitümlü malzemelerin yüksek sıcaklıklarda işlenebilirliği artırdığı değerlendirilmektedir.

- Yoğurma sayısının belirlenmesi bitümün penetrasyon sınıfına, agreganın cins ve özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle bahse konu sayı, her bir çalışmada farklılık gösterebilmektedir. Buradan hareketle, bitüm, katkı ve agrega özellikleri belirlendikten sonra elde edilecek olan ampirik denklemlerin kullanımının sonuçların yorumlanması bakımından daha uygun olacağı düşünülmektedir.
- Optimum bitüm içeriği %1 ve %3 katkılı bitüm için azalmıştır. %1-3 aralığında yapılacak PVC modifikasyonu ihtiyaç duyulan bitüm oranını %2 oranında azaltacaktır.
- %1 ve %5 PVC modifiyeli karışımlarda stabilite değerleri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Ancak akma değeri %1 için 2,13 mm olmuştur. Stabilite ve akma değerleri üzerinden değerlendirildiğinde %1 PVC modifikasyonlu karışım en iyi performansı vermiştir.
- Dolaylı çekme dayanımı değerleri (ITS) saf ve PVC modifiyeli karışımlarda şartname alt limitlerinin (5 kg/cm²) üzerindedir. Bütün modifikasyon oranları şartname kullanılabılır olarak değerlendirilmiştir. %1 PVC modifikasyonlu bitümde ITS değeri maksimuma ulaşmıştır. Ayrıca TSR kıyasına bakıldığında %3 PVC modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın TSR değeri %98 olmuştur. %3 PVC modifiyeli bitümlü karışım nemden ve donma-çözülme döngüsünden neredeyse etkilenmemiştir.
- Deneylerin sonuçları incelendiğinde PVC modifiyeli asfalt karışımların uygulamada kullanılabılır olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylelikle hem atık haldeki PVC değerlendirilmiş olacak hem de çeşitli etkilere karşı daha uzun ömürlü bir karışım elde edilmiş olacaktır.

Çalışma kapsamında yoğun gradasyonlu agrega tercih edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, farklı gradasyonlar için ideal PVC katkı oranlarını belirlenerek, modifikasyon oranının optimize edilmesi sağlanabilir. Ayrıca çalışma kapsamında en iyi performans %1 ve %3 PVC modifikasyonu aralığında elde edilmiştir. Dolayısı ile gelecekte yapılabilecek çalışmalarda %2 PVC ile modifiye edilmiş bitümlü karışımın performansı %1 ve %3 PVC ile modifiye edilmiş karışımlarla kıyaslanarak modifikasyon değeri optimize edilebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar Dr. Fatma Birinci Kayaalp'e desteği için teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'nun 23ADP145 numaralı projesi kapsamında finansal olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

- Kök B., Yalçın E., Yılmaz M., and B. Büyük, Investigation of conventional and rheological properties of bitumen modified with Selenizza natural asphalt, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 921-932, 2023.
- Kumandaş A., Pancar E. B., Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Güncel Katkı Maddeleri: Bir Literatür Araştırması, OMÜ Mühendis. Bilim. ve Teknol. Derg., 3 (2), 109-140, 2023.
- Lahl U., Zeschmar-Lahl B., More than 30 Years of PVC Recycling in Europe—A Critical Inventory, Sustainability, 16, (9), 3854, 2024.
- Lu L., Li W., Cheng Y., Liu M., Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review, Waste Manag., 166, 245-258, 2023.
- Naderi Kalali E., Lotfian S., Entezar Shabestari M., Khayat-zadeh S., Zhao C., Yazdani Nezhad H., A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials, Curr. Opin. Green Sustain. Chem., vol. 40, 100763, 2023.
- Fakhri M., Shahryari E., and Ahmadi T., Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA), Constr. Build. Mater., 326, 126780, 2022.
- Ziari H., Nasiri E., Amini A., Ferdosian O., The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue

- performance of asphalt binders and mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 203, 188–200, 2019.
8. Behl A., Sharma G., Kumar A., A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads, *Constr. Build. Mater.*, 54, 113–117, 2014.
9. Kazim H. A. A., Naser A. F., Jawad Z. F., Evaluating the Properties of Improved Asphalt Material and Hot Mixture Asphalt by Adopting Rotational Viscosity Test and Wheel Track Test, *J. Kejuruter.*, 36 (3), 877–889, 2024.
10. Murana A. A., Amartey Y. D., Abah L. I., Ibedu K. E., Bitrus J. N., Strength Properties of Asphalt Mixture Produced with Polyvinyl Chloride (PVC) Modified Bitumen, *Covenant Journal of Engineering Technology*, 8 (2), 2024
11. Tayh S. A., Jasim A. F., Mughaidir A. M., Yousif R. A., Performance enhancement of asphalt mixture through the addition of recycled polymer materials, *Discov. Civ. Eng.*, 1 (68), 2024.
12. Pangestika S. H., Saptaji K., Nandiyanto A. B. D., Liman S. D., Triawan F., Utilization of plastic waste to improve properties of road material: A review, *Mech. Eng. Soc. Ind.*, 3 (3), 119–135, 2023.
13. Kumar B., Kumar N., Enhancing asphalt mixture performance through waste plastic modification: a comprehensive analysis of optimal compositions and volumetric properties, *J. Struct. Integr. Maint.*, 9 (2), 2376804, 2024.
14. Köfteci S., Ahmedzade P., Kultayev B., Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics, *Constr. Build. Mater.*, 73, 592–602, 2014.
15. Ezzat E. N., Abed A. H., Prediction of modified asphalt concrete rutting depth using statistical model, *Mater. Today Proc.*, 42, 1784–1790, 2021.
16. Xiao R., Shen Z., Polaczyk P., Huang B., Thermodynamic Properties of Aggregate Coated by Different Types of Waste Plastic: Adhesion and Moisture Resistance of Asphalt-Aggregate Systems, *J. Mater. Civ. Eng.*, 35 (8), 04023261, 2023.
17. Alsaleh F., Properties of Hot Mix Asphalt Containing Reclaimed Asphalt Pavement of the Aleppo highways, *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.*, 8 (8), 4037–4043, 2020.
18. Salman N., Jaleel Z., Effects of waste PVC addition on the properties of (40-50) grade asphalt, 3rd Int. Conf. Buildings, *Constr. Environ. Eng.*, Sharm el-Sheikh, 162 (01046), 2018.
19. Abed M. A., Al-Tameemi A. F., Abed A. H., Wang Y., Direct tensile test evaluation and characterization for mechanical and rheological properties of polymer modified hot mix asphalt concrete, *Polym. Compos.*, 43 (9), 6381–6388, 2022.
20. Yüknü K., Öztürk Y., Komut M., Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2021.
21. ASTM International, ASTM D5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2021
22. ASTM International, ASTM D36: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, PA, USA, 2022
23. Read J., Whiteoak D., The Shell bitumen handbook (5th ed.), Thomas Telford Publ., London, 2003.
24. Yılmaz M. Ahmedzade P., Investigation of Pure and SBS Modified Bituminous Binder Properties After Short Term Ageing by Using Two Different Ageing Methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (3), 569-575, 2013.
25. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2023.
26. ASTM International, ASTM D4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
27. Presti D. Lo, Fecarotti C., Clare A. T., Airey G., Toward more realistic viscosity measurements of tyre rubber-bitumen blends, *Constr. Build. Mater.*, 67, 270–278, 2014.
28. Yero S. A., Hainin M. R., Viscosity Characteristics of Modified Bitumen, *ARNP Journal of Science and Technology*, 2 (5), 2012.
29. ASTM International, ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, West Conshohocken, PA, USA, 2019
30. ASTM International, ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, West Conshohocken, PA, USA, 2024
31. ASTM International, ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, West Conshohocken, PA, USA, 2022
32. ASTM International, ASTM C535: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, West Conshohocken, PA, USA, 2016
33. ASTM International, ASTM C88/C88M-24 – Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA, USA, 2024.
34. Oliver J. W., A review of Austroads gyratory compaction research, Austroads, Sydney, 2008.
35. James R. S., Cooley L. A., Ahlrich R. C., Prowell B. D., Howard I. L., Development of Design Gyrator Levels for Airfield Asphalt Pavement, *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 4 (1), 61–79, 2015.
36. Xie H., Watson D. E., Brown E. R., Evaluation of Two Compaction Levels for Designing Stone Matrix Asphalt, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 1929 (1), 149–156, 2005.
37. Alderson A., Selection of a Laboratory Asphalt Compactor for Australasia, Austroads, Sydney, 2011
38. Tapkın S., Keskin M., Design Gyrator Number Determination of 100 mm-Diameter Asphalt Mixtures, *Int. J. Civ. Eng.*, 17 (9), 1383–1396, 2019.
39. Watson D. E., Moore J., Heartsill J., Jared D., Wu P., Verification of Superpave Number of Design Gyrator Compaction Levels for Georgia, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2057 (1), 75–82, 2008.
40. Cetin A., Evirgen B., Karşlıoğlu A., Tuncan A., The Effect of Basalt Fiber on the Performance of Stone Mastic Asphalt, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 65 (1), 2021.
41. Tapkın S., Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses, *Constr. Build. Mater.*, 44, 399–410, 2013.
42. Görkem İ. Ç., Artağan S. S., Kayaalp B. T., Saykan C., Özdemir İ. A., Determination of Resistance to Water-Induced Damage of Bituminous Mixtures Containing Hydrated Lime Prepared with Different Contents of PVC Waste, *Firat Univ. J. Exp. Comput. Eng.*, 3 (1), 28–51, 2024.
43. Muniandy R., Aburkaba E. E., Effect of Filler Type and Particle Size on Moisture Susceptibility of Stone Mastic Asphalt Mixtures, *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 4 (11), 5522–5532, 2010.
44. Naji J. A., Improving the Stripping Resistance of Local Hot Mix Asphalt Containing Basalt Aggregate by the use of Cement, *J. Sci. Technol.*, 13 (2), 57–66, 2008.
45. Arifuzzaman M., Islam M. S., Hossain M. I., Moisture damage evaluation in SBS and lime modified asphalt using AFM and artificial intelligence, *Neural Comput. Appl.*, 28 (1), 125–134, 2017.
46. Yao Z., Zhu H., Gong M., Yang J., Xu G., Zhong Y., Characterization of asphalt materials' moisture susceptibility using multiple methods, *Constr. Build. Mater.*, 155, 286–295, 2017.
47. ASTM International, ASTM D4867/D4867M-21 – Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Mixtures, West Conshohocken, PA, USA, 2021.

