

# SOĞUK BÖLGELERDE KULLANILACAK SAF BİTÜMÜN MODİFİKASYONU VE BETON ASFALT ÜRETİMİNDE KULLANIMI: B70/100 BİTÜM ÖRNEĞİ

**Abdulgazi GEDİK<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34469, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 29.09.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 12.11.2021 DOI: 10.54365/adyumbd.1001934

## ÖZET

Trafik yüklerine ek olarak, soğuk iklim bölgelerindeki asfalt kaplamalı yollar termal olarak indüklenen gerilmelere maruz kalmaktadır ki bu da düşük sıcaklık çatlaklarına neden olmaktadır. Bu nedenle, bir takım bitüm modifikasyonları ile bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi çok önemlidir. Bu çalışmanın temel amacı, Polimer Modifiye Bitüm (PMB) performansını değerlendirmek ve ardından optimum polimer miktarını tayin etmektir. Bu doğrultuda, standart saf B70/100 penetrasyon dereceli bitüm bu çalışmada %4, %4.5 ve %5 Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ile modifiye edilmiştir. Optimum SBS miktarı tespit edildikten sonra, aşınma tabakası için PMB'li beton asfalt numuneleri standart Marshall tasarım yöntemine göre üretilmiştir. SBS modifikasyonunun etkisini daha fazla araştırmak için Marshall briketlerinin mekanik ve hacimsel özellikleri araştırılmıştır. Genel olarak; %5.2 PMB içeren (%4 SBS ile modifiye edilmiş) asfalt betonunun Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) teknik şartnamesine göre uygun performans gösterdiği ve bu karışımların soğuk iklim bölgeleri için umut verici olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Modifikasyon, Polimer, Asfalt aşınma tabakası, Soğuk iklim bölgesi, Marshall metodu

## MODIFICATION OF PURE BITUMEN TO BE USED IN COLD REGIONS AND ITS USE IN ASPHALT CONCRETE PRODUCTION: A CASE OF B70/100 BITUMEN

### ABSTRACT

In addition to traffic loads, asphalt-paved roads in cold-climatic regions are subjected to thermally-induced stresses, resulting in low-temperature cracks. As such, improving the physical and rheological properties of binder by some bitumen modifications is very essential. The main aim of this study is to evaluate the performance of Polymer-Modified-Bitumen (PMB) and to determine the optimal polymer amount. Accordingly, standard neat B70/100 penetration grade bitumen was modified with 4%, 4.5%, and 5% Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) in this study. After obtaining the optimum SBS amount, the asphaltic specimens with PMB for wearing course were manufactured according to the standard Marshall design method. Mechanical and volumetric properties of Marshall briquettes were evaluated to further investigate the effect of SBS modification. Overall, it is concluded that asphalt concretes containing 5.2% PMB (modified with 4% SBS) performed satisfactorily in line with Turkey General Directorate of Highways' (KGM) technical specifications and they are promising for cold-climatic regions.

**Keywords:** Modification, Polymer, Asphalt wearing course, Cold-climatic region, Marshall method

### 1. Giriş

Beton asfalt üretiminde kullanılan bitümlü bağlayıcının türü ve kimyasal bileşimi esnek kaplamalı yolların trafik yüklerine ve çevre koşullarına dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Geçmişte saf geleneksel bitüm ile yapılan asfalt kaplamalar gerekli teknik şartnameleri sağlamaktaydı ve o zamanlar yaygın olan dingil yükleri altında tatmin edici bir performans sergileyebilmekteydi.

\*e-posta: [gedikab@hotmail.com](mailto:gedikab@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1429-034X>

Ancak saf bitüm ile yapılan asfalt kaplamalar son yıllarda artan trafik hacmi ve dolayısıyla artan trafik yükü nedeniyle istenilen performansı artık karşılayamaz hale gelmiştir [1]. Ayrıca saf bitümle yapılan kaplamalarda yolun servis ömrü süresince ağır bakım ve/veya onarım gerektiren bozulmalar tespit edilmiştir.

Bu nedenle karayolu kuruluşları ekonomik, çevre dostu, yeni uluslararası şartnamelerle uyumlu, kullanışlı, pratik ve uygun maliyetli teknik yöntemler ışığında saf bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerini geliştirmenin arayışı içine girmiştir. Özellikle 1970'lerin başından itibaren dünyanın değişik yerlerinde çeşitli karayolları kuruluşları, asfalt üreticileri ve bilim insanları bu konuya büyük ilgi göstermeye başlamış ve saf bitümün özelliklerini iyileştirmek için değişik modifikasyonlar önermiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan fiziksel modifikasyon; temel olarak polimer (elastomerler ve plastomerler) ve polimer olmayan katkı maddeleri (filler, genişletici, soyulma önleyici ve oksidasyon önleyici ajanlar) muhteva etmelerine göre kategorize edilmektedir. Fiziksel bitüm modifikasyonunda sıkça kullanılan termoplastik elastomer katkı maddeleri; Strien-Butadien-Stirene (SBS), Strien-Butadien-Kauçuk (SBR), Strien-İzopren-Kauçuk (SIS), Stiren-Etilen-Butadien-Stiren (SEBS), Etilen-Propilen-Dien Terpolimer (EPDM), Isobuten-Isopren Copolimer (IIR), Doğal Kauçuk, Ufalanmış Tekerlek Kauçuğu, Polibutadin (PBD) ve Poliisopren olarak sıralanabilir [2]. Fiziksel bitüm modifikasyonuna ilaveten, daha az yaygın olan diğer bir modifikasyon türü ise kimyasal reaktif modifikasyondur [3].

Bitümlü bağlayıcı modifikasyonundaki temel hedef; saf bitümün kıvamını değiştirerek özellikle sıcak havalarda oluşabilecek tekerlek izini ve soğuk havalarda meydana gelebilecek termal çatlakları engellemek, bitüm ve agrega daneleri arasındaki adhezyonu artırarak olası soyulma ve sökülmelemin önüne geçebilmek ve yaşlanma ile oksitlenmeye karşı asfalt kaplamaların direncini arttırabilmektir. Her ne kadar bağlayıcı modifikasyonu ile bitümün vizkoelastik davranışı üzerinde önemli ölçüde iyileşmeler elde edilse de modifikasyon esnasında bazı sorunlarla karşılaşmaktadır ki bunlardan en önemlisi kullanılan modifiye edici ajan ile bitümlü bağlayıcının matrisi arasında görülen uyumsuzluktur. Bu sorun esas olarak modifiye edici ajan ile bitümlü bağlayıcı arasındaki çözünürlük katsayısı, moleküler ağırlık, yoğunluk ve viskozite gibi farklı temel özellikler nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Modifiye edilmiş bağlayıcının faz ayırımına duyarlı olup olmadığını tespit etmek için mikroskobik değerlendirmenin yanı sıra bazı stabilite ve uyumluluk testleri bulunmaktadır. Ve bu testler daha çok polimer modifiye bitümlü (PMB) bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır.

Avrupa, Asya ve Afrika kıtaları arasında bağlantı sağlayan Türkiye, coğrafik konumu itibariyle ulaştırma sektöründe öncül bir role sahiptir. Türkiye'nin özellikle karayolu ağı sistemi; kendi ulusal gelişimi, bulunduğu bölgenin bütünlüğü ve aynı zamanda küresel gelişimin sağlanabilmesi adına anahtar nitelik taşımaktadır. Türkiye'de son yıllarda artış gösteren bölünmüş yol yapım çalışmaları ve dolayısıyla karayolu üstyapı imalatları inşaat sektörüne önemli ivmelenmeler kazandırarak ülke ekonomisinde lokomotif etki oluşturmuştur. 2017 yılında sıcak ve ılık asfaltın toplam üretimi Avrupa Birliği-28 (EU-28) ülkeleri için %3.1 oranında artarak yaklaşık 234 milyon tona; Norveç, İsviçre ve Türkiye dahil olmak üzere tüm Avrupa ülkeleri için ise %5.0 oranında artarak 297 milyon tona yükselmiştir. Aynı yıl Türkiye, toplam 46 milyon ton asfalt üretimi ile tüm Avrupa'da lider ülke olurken Türkiye'yi 42 milyon ton üretimle Almanya ve 33.7 milyon ton üretimle Fransa izlemiştir [4]. Ülkemizde üretilen bu asfalt betonunun büyük bir miktarı modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılarla üretilmekte olduğundan tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de bitüm modifikasyonu büyük önem arz etmekte olup bu konu hakkında çok önemli bilimsel ve akademik çalışmalar yapılmaktadır.

Literatürde bitüm modifikasyonu için optimal miktarda polimer kullanılmasını vurgulayan birçok çalışma bulunmaktadır. Optimum değer altında polimer kullanılması modifiye edilecek bağlayıcıda arzu edilen performansın elde edilememesiyle sonuçlanabilirken [5, 6], gereğinden fazla miktarda polimer kullanılması depolama stabilitesinde azalmaya, polimer fazının baskın olmasına ve yüksek maliyetlere yol açabilmektedir [7, 8]. Bu nedenle polimer cinsine bağlı olarak bitüm modifikasyonu için genel olarak bağlayıcının ağırlıkça %2-10%'u arasında polimer kullanılması tavsiye edilmektedir [9]. Her ne kadar polimer teknolojisinde yaşanan son gelişmeler bu aralığın %2-%3 arasında olabileceğini işaret etse de %4-%6 arasında polimer kullanımı bitüm modifikasyonu için ideal olarak değerlendirilmektedir [8].

Bu çalışmanın amacı soğuk bölgeler için B70/100 penetrasyon dereceli saf geleneksel bitüm modifikasyonunda kullanılacak Strien-Butadien-Stirene'nin (SBS) optimal miktarını deneysel yöntemlerle bulmak ve elde edilen modifiye bitüm ile üretilen ve aşınma tabakası olarak dizayn edilecek bitümlü sıcak karışımın mekanik ve hacimsel özelliklerini tayin etmektir.

## 1. Materyal ve Metod

Bu deneysel çalışmada Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B70/100 penetrasyon dereceli saf bitüm temel bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda modifiye ajan olarak SBS (Globalprene 3501) bitümün ağırlıkça üç farklı yüzdesi oranında (%4, %4.5 ve %5) kullanılmıştır. Uygulama bölgesi ise Türkiye'de göreceli olarak daha soğuk olan ve karasal iklimin beligen bir şekilde yaşandığı Bingöl İli seçilmiştir. Belirtilen oranlar ile hazırlanan modifiye bitümlere Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) belirtilen bitüm deneyleri uygulanmıştır ve bu bağlayıcıların söz konusu yöre için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından belirlenen PMB 76-28 kriterlerine uygunluğu araştırılmıştır.

400 gram ağırlığındaki saf bitüm etüvde akışkan hale gelinceye kadar 150°C sabit sıcaklıkta 1 saat süre ile ısıtılmıştır. %4, %4.5 ve %5 oranında kullanılacak modifiye ajan miktarları hassas terazide ölçülmüştür. Daha sonra modifiye edici ajan, saf bitüme topaklanma olmayacak şekilde ilave edilerek sabit sıcaklıkta ve sabit hızda (165°C, 1000 dakika/devir) homojen karışım elde edilecek şekilde 1 saat mekanik blendirde karıştırılmıştır. Olası yaşlanmayı, evaporasyonu ve oksitlenmeyi engellemek/minimize edebilmek ve sabit ısılı bir karışım ortamı sağlamak için karışım esnasında mekanik karıştırıcının kapağı kapatılmıştır ve karışımın havayla olan teması engellenmeye çalışılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra ilgili kodlar verilen numuneler ısı ve güneş ışığından etkilenmeyecek şekilde muhafaza edilmiştir.

## 2. Modifiye Bitüm Deneyleri

Taze (yaşlanmamış), kısa vadede yaşlandırılmış ve kısa+uzun vadede yaşlandırılmış modifiye bitüm numunelerine hem geleneksel hem de yeni nesil Superpave deneyleri uygulanmıştır.

### 2.1. Orijinal Bitüm Deneyleri

Taze numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için özgül ağırlık, parlama noktası, penetrasyon, yumuşama noktası ve elastik geri dönme deneyleri; reolojik davranışlarını tespit etmek için Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi yapılmıştır.

TS EN 15326 [10] ve TS EN ISO 2592 [11] standartları doğrultusunda yapılan deneyler SBS oranından bağımsız olarak modifiye edilmiş her bir bitümün 1.01 özgül ağırlığa ve 220°C'nin üzerinde bir parlama noktasına sahip olduğunu göstermiştir.

%4, %4.5 ve %5 oranında SBS ile modifiye edilmiş taze bitüm numunelerine TS EN 1426 [12] standartlarına uygun (100 gram ağırlığın standart bir iğneye 25°C sabit sıcaklıkta 5 saniye uygulanması) olarak yapılan penetrasyon deneyi sonuçları Şekil 1 (a)'da gösterilmiştir. Penetrasyon değerlerinin artan SBS miktarı ile uyumlu bir şekilde değişmediği görülmektedir. %4 SBS içeren modifiye bitümün penetrasyonu 44 d-mm iken 4.5% SBS miktarı penetrasyonu 38 d-mm'e indirmiştir ve 5% oranındaki SBS ise penetrasyonu tekrar arttırarak 45 d-mm'ye ulaşmasını sağlamıştır. Özetle %4 ve %5 SBS içeren modifiye bitümlerin orijinal haldeyken hemen hemen aynı penetrasyon dereceli olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen her bir penetrasyon derecesi KTŞ'de PMB 76-28 için belirlenen alt ve üst limit değerleri (25-55 d-mm) içinde kalmaktadır [13].

Bu çalışmadaki modifiye edilmiş bitümlerin standart yük altında katı kıvamdan işlenebilir bir akışkanlığa geçtiği sıcaklığı tespit etmek için yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 [14] standartlarına (su banyosunda 25 mm yükseklikten düşen 3.5 gram ağırlığındaki standart bilye) uygun

olarak tatbik edilmiştir. Şekil 1 (b)'den de anlaşılacağı üzere SBS miktarındaki artış ile birlikte yumuşama noktasında basamak şeklinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. %4, %4.5 ve %5 SBS içeren modifiye bitümler sırasıyla 72, 75 ve 77°C'de 3.5 gram ağırlığındaki standart bilyeleri artık taşıyamaz hale gelmiştir ve anılan sıcaklıklar bu bağlayıcılar için yumuşama noktası olarak tayin edilmiştir.

Bitümlü bağlayıcılar vizkoelastik bir malzeme olup yüksek yükleme hızlarında elastik davranış sergileyebilmektedir. Bir başka deyişle; belirli bir yük altında deformasyona uğrayan bitüm, maruz kaldığı yük üzerinden kaldırılınca elastik davranışı nedeniyle yüklemmeden önceki eski haline geri dönebilmektedir. Bitümün bu elastik geri dönme davranışı, genellikle bağlayıcının yorulma direncinin değerlendirilmesi veya herhangi bir çatlama ve/veya deformasyon olmaksızın büyük basınçları ne kadar absorbe edebileceğinin bir ölçütüdür. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bir takım özel modifiye edici ajanlar gerek morfolojik gerek kimyasal gerekse fiziksel özellikleri nedeniyle modifiye edilmesi hedeflenen bağlayıcılara önemli bir miktarda elastik geri dönme özelliği kazandırabilmektedir. Bilhassa SBS çok yüksek elastik geri kazanımla sonuçlanan çok yüksek bir elastik butadien zincirleriyle sert stiren alanlarına bağlanarak üç boyutlu bir ağ oluşturabilmektedir [2]. Bu çalışmada TS EN 13398 [15] standartları doğrultusunda yapılan 25°C test sıcaklığında, %4 oranındaki SBS %82 oranında elastik geri dönme kazandırırken modifiye ajanın miktarındaki artış elastik davranışta ilave bir artış oluşturmamıştır bilakis küçük bir oranda düşüşe yol açmıştır. Şekil 1 (c)'de de görüleceği üzere %4.5 ve %5 oranında SBS'in kullanılması aynı miktarda (%80) elastik geri dönme ile sonuçlanmıştır ki bu değer KTS'de PMB 76-28 için belirtilen şartları yerine getirmektedir (min. %80) [13].

Modifiye edilmemiş saf bağlayıcıların yük altındaki davranışları göreceli olarak daha basit olup yukarıda belirtilen geleneksel test metodlarıyla (penetrasyon, yumuşama noktası ve elastik geri dönme gibi) tahmin edilebilmektedir. Ancak modifiye edilmiş bitümlerin sınıflandırılması, uluslararası teknik şartnamelere uygunluğu ve reolojik özelliklerinin tesbiti daha karmaşık olduğundan bu tür bağlayıcıların vizkoelastik davranışlarını ölçmek için daha spesifik deney yöntemleri gerekmektedir. Hal böyle olunca bu çalışmada yüksek sıcaklıklarda meydana gelebilecek tekerlek izi (oluklanma) dayanımını ölçmek için SBS ile modifiye edilmiş numunelere DSR testi uygulanmıştır. Tekerlek izi; beton asfalt kaplamalarda kalıcı deformasyonların ve/veya konsolidasyonların yol kaplaması üzerinde zamanla birikmesine bağlı olarak ortaya çıkan önemli bir bozulma türüdür. Her ne kadar tekerlek izi yetersiz kaplama kalınlığı, sıkıştırma eksikliği ve uygunsuz asfalt karışım dizaynından kaynaklansa da bitümlü bağlayıcıların rolü büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle orijinal bitümler için 10 rad/sn'de yapılan DSR testindeki tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) en az 1.0 kPa olması istenmektedir. Şekil 1 (d)'de görüleceği üzere  $G^*/\sin\delta$  değerinin en az 1.0 kPa olduğu sıcaklıklar %4, %4.5 ve %5 SBS ile modifiye edilmiş bitümler için sırayla 92.3, 98.3 ve 94°C olup bu yenilme sıcaklıkları KTS'de PMB 76-28 için gereken minimum koşulu ( $\geq 76^\circ\text{C}$ ) yerine getirmektedir [13].

## 2.2. Kısa Vadede Yaşlandırılmış Bitüm Deneyleri

Bu çalışmada; bağlayıcıların depolanması, sıcak asfalt plentine aktarılması, plentte karıştırılması, karışımın taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması işlemleri esnasında maruz kalabileceği kısa vadedeki yaşlanmayı simüle etmek amacıyla numunelere döner ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) uygulanmıştır. TS EN 12607-1 [16] standartları (8 adet 35 gram bitümün 163°C'de 85 dakika  $15\pm 0.2$  r/dak hızla döndürülerek ısıtılması) doğrultusunda yaşlandırılmış bu numunelerin daha sonra hem geleneksel hem de reolojik özellikleri tayin edilmiştir.

Şekil 2 (a)'da da görüleceği üzere RTFOT deneyi SBS oranından bağımsız olarak tüm numunelerde %0.4'lük bir kütle değişimine (kayıp) neden olmuştur ki bu değer KTS'de PMB 76-28 için belirtilen şartname limitlerinin (maks. %0.8) altındadır [13]. Kalıcı penetrasyon yüzdesi; 4% ve 4.5% SBS ile modifiye edilmiş bitümler için %61 iken %5 SBS içeren numuneler için %55'dir (Şekil 2 (b)). Elde edilen her bir kalıcı penetrasyon yüzdesi yine KTS'de belirtilen şartname değerini yerine getirmektedir (min. %45) [13].

Şekil 2 (c)'de de görüleceği üzere RTFOT yaşlandırması düşük oranda (%4) SBS ile modifiye edilmiş bitümün yumuşama noktasında önemli bir artışa neden olurken (15°C) bu artış SBS miktarının artmasıyla birlikte kademeli bir şekilde azalmıştır (%4.5 SBS için 11°C; %5 SBS için 9°C).

Yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış gösteren bağlayıcının ağır taşıt trafiği altında asfalt betonundaki boşluklara doğru akmasıyla ortaya çıkan oluklanmayı engellemek/minimize etmek için tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için 10 rad/s hızla yapılan DSR deneyinde minimum 2.2 kPa olması istenmektedir. Bu çalışmada kısa vadede yaşlandırılmış numunelere uygulanan DSR test sonuçları Şekil 2 (d)'de gösterilmiştir. Tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) en az 2.2 kPa olduğu sıcaklıklar %4, %4.5 ve %5 SBS ile modifiye edilmiş numuneler için sırasıyla 107.1, 111.1 ve 109.6°C olup bu sıcaklıklar PMB 76-28 bağlayıcısı için KTŞ'de belirtilen minimum yenilme sıcaklığı (76°C) şartını yerine getirmektedir [13].

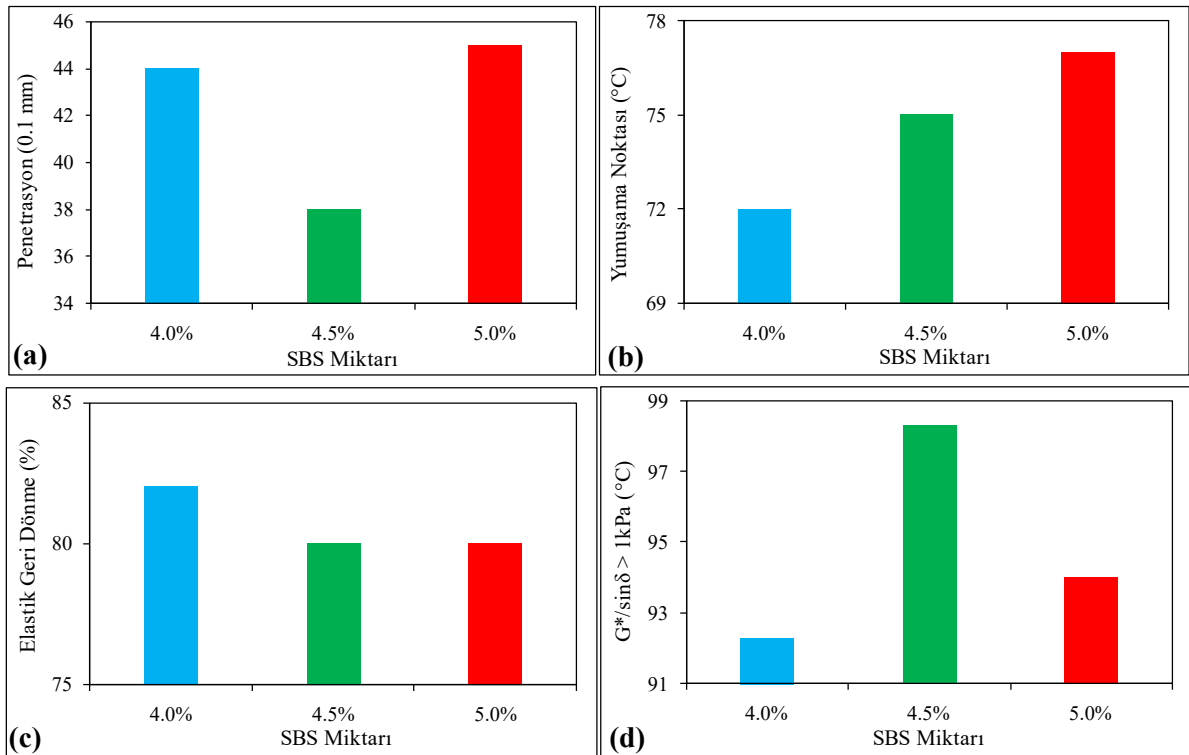
### 2.3. Kısa+Uzun Vadede Yaşlandırılmış Bitüm Deneyleri

Beton asfalt yolların servis ömrü süresince ortaya çıkabilecek yorulma çatlakları ile düşük ve orta sıcaklıklardaki termal çatlaklara karşı direncini belirleyebilmek için uzun vadede yaşlandırılmış bağlayıcının incelenmesi gerekmektedir. Bağlayıcıları laboratuvar ortamında uzun vadede yaşlandırmak için kullanılan birçok simulator deney bulunmasına rağmen bu çalışmada dünyada ve ülkemizde sıkça kullanılan basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) kullanılmıştır. Daha önceden RTFOT deneyi ile kısa vadede yaşlandırılmış SBS modifiyeli bitüm numunelerine TS EN 14769 [17] standartları doğrultusunda (10 tane 3.2 mm film kalınlığına sahip 50 gram numunenin 2.1 MPa basınca 100°C'de 20 saat maruz bırakılması) PAV uygulanmıştır. Daha sonra kısa+uzun vadede yaşlandırılmış bu numunelerin reolojik özellikleri DSR ve Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) testleriyle belirlenmiştir.

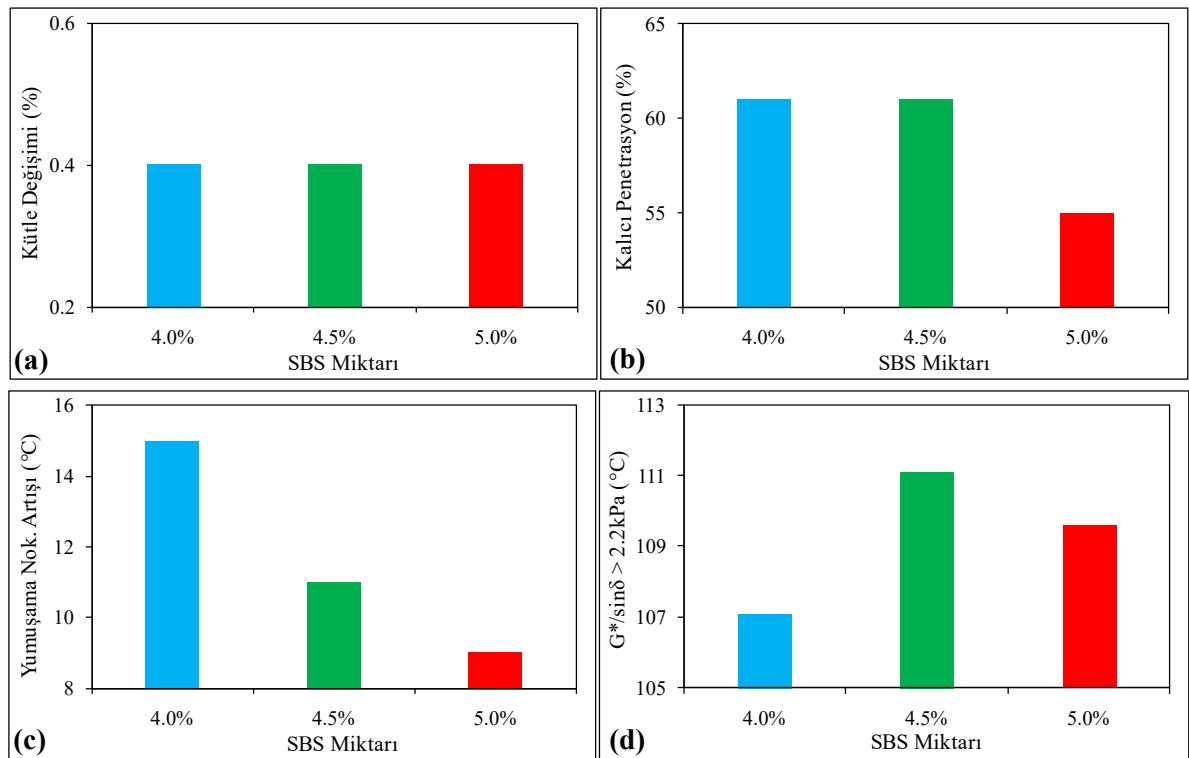
Tekrarlanan trafik yüklerine maruz kalan asfalt kaplamalarda, yorulma nedeniyle birbirleriyle bağlantılı çatlaklar serisi oluşmaktadır. Asfalt kalınlığı daha az olan ince kaplamalarda yorulma çatlakları; çekme gerilmesinin en yüksek olduğu esnek tabakanın tabanından başlamaktadır ve bu çatlaklar daha sonra bir veya daha fazla boyuna çatlak olarak yüzeye yayılmaktadır ki bu tür çatlaklar "aşağıdan yukarıya" veya "klasik yorulma" çatlağı olarak adlandırılmaktadır. Asfalt kalınlığı daha fazla olan kalın kaplamalarda ise yorulma çatlakları; araç tekerleğinin kaplama ile temas ettiği ve bağlayıcının yaşlanmasına bağlı olarak lokalize çekme gerilmelerinin daha çok görüldüğü yüzey noktasından başlayarak "yukarıdan aşağıya" doğru hareket etmektedir. Tekrarlayan yüklemelerden sonra bu boyuna çatlaklar "timsah sırtını" andıran bir desen şeklinde ve çok taraflı keskin açılı parçalar oluşturacak şekilde birleşmektedir [18]. Servis ömrü boyunca esnek kaplamalardaki bu tür yorulma çatlaklarının engellenmesi/minimize edilmesi için 10 rad/s hızla yapılan DSR deneyinde kısa+uzun vadede yaşlandırılmış numunelerin yorulma çatlağı parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) en fazla 5.0 MPa olması istenmektedir.

Bu çalışmada kısa+uzun vadede yaşlandırılmış numunelere uygulanan DSR test sonuçları Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Yorulma çatlağı parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) en fazla 5.0 MPa olduğu sıcaklıklar %4, %4.5 ve %5 SBS ile modifiye edilmiş numuneler için sırasıyla 11.7, 14.2 ve 13.7°C olup bu sıcaklıklar PMB 76-28 bağlayıcısı için KTŞ'de belirtilen yenilme sıcaklığı şartını ( $\leq 28^\circ\text{C}$ ) yerine getirmektedir [13].

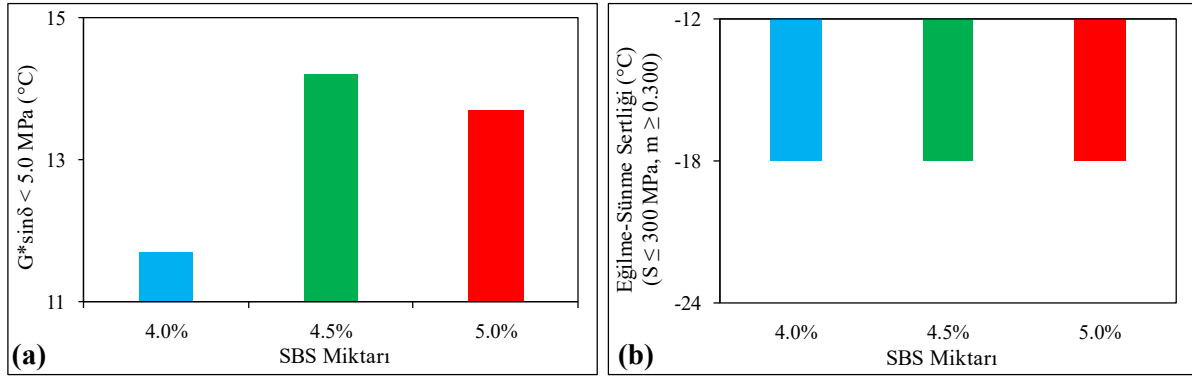
Düşük sıcaklıklarda oluşabilecek termal çatlaklara karşı asfalt kaplamalı yolların performansını belirlemek için BBR testi ile bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve sünme özellikleri ölçülmektedir. Bu çalışmada belirli boyutlarda hazırlanan kısa+uzun vadede yaşlandırılmış SBS modifiyeli bitüm kiriş numunelerine TS EN 14771 [19] standartları doğrultusunda BBR testi uygulanmıştır. 240 saniye boyunca sabit yük uygulanan numunelere ait zaman-deformasyon ve zaman-sünme sertliği grafikleri çizilmiştir. 60 saniye sonunda sünme sertliğinin (S) 300 MPa'dan daha düşük olduğu ve sünme oranının (m-değeri) 0.300'dan daha yüksek olduğu yenilme sıcaklıkları tespit edilmiştir. Şekil 3 (b)'de görüleceği üzere SBS oranından bağımsız olarak bu şartların sağlandığı sıcaklık her bir numune için -18°C olup bu değer PMB 76-28 bağlayıcısı için KTŞ'de belirtilen BBR yenilme sıcaklığı şartını ( $\leq -18^\circ\text{C}$ ) yerine getirmektedir [13].



**Şekil 1.** Orijinal numunelere ait penetrasyon (a), yumuşama noktası (b), elastik geri dönme (c) ve DSR yenilme sıcaklığı (d).



**Şekil 2.** Kısa vadede yaşlandırılmış numunelere ait kütle değişimi (a), kalıcı penetrasyon (b), yumuşama noktası artışı (c), ve DSR yenilme sıcaklığı (d).



**Şekil 3.** Kısa+uzun vadede yaşlandırılmış numunelere ait DSR yenilme sıcaklığı (a) ve BBR yenilme sıcaklığı (b).

Sonuç olarak bu çalışmada; soğuk iklimli bölgelerde kullanılması planlanan B70/100 saf bitümün farklı oranlarda (%4, %4.5 ve %5) modifiye edilmesiyle elde edilen numunelerin taze, kısa vadede yaşlandırılmış ve kısa+uzun vadede yaşlandırılmış hallerine uygulanan geleneksel ve reolojik testler neticesinde ve maliyet anlamında daha ekonomik olması nedeniyle modifikasyon için %4 oranında SBS (Globalprene 3501) kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca %4 SBS modifikasyonu, daha az polimer kullanılmasını dolayısıyla homojen bir bağlayıcı elde etmek için karıştırma esnasında daha az enerji tüketimini ve daha az gaz salınımını, bitüm fazı ile polimer fazı arasındaki uyumun artmasını ve depo stabilite probleminin azalmasını sağlayacaktır.

### 3. Asfalt Karışım Dizaynı

Hveem metoduna ek olarak, Marshall ve Superpave yöntemi, karayolu mühendisliğinde bitümlü sıcak karışım dizaynı için başvurulan en yaygın tasarım yöntemleridir. Her ne kadar ABD'nin birçok eyaleti yakın zamanda tamamıyla Superpave tasarım yöntemine geçmiş olsa da Marshall tasarımının temel ilkeleri dünyanın çoğu yerinde olduğu gibi ülkemizde de halen yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [20]. Bu çalışmada da aşınma tabakasında kullanılacak beton asfalt karışım dizaynı için TS 3720'de [21] ayrıntılı olarak belirtilen Marshall tasarım yöntemi kullanılmıştır. Dizaynda; Bingöl İli, Geylan taşocağında üretilen kalker menşeli kaba ve ince agrega ile mineral filler ve %4 oranında SBS kullanılarak hazırlanan PMB kullanılmıştır. Karışım gradasyonunun hazırlanmasında 10 günlük konkasör elek analizi sonuçları esas alınarak %15 oranında 19-12 mm, %45 oranında 12-5 mm ve %40 oranında 5-0 mm dane boyutlu agregalar kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 1'de agregaların kullanım oranları, dizayn gradasyonu ve aşınma tabakası için KGM tarafından belirtilen şartname limitleri verilmektedir.

Çizelge 1'den de görüleceği üzere bu çalışmada seçilen karışım gradasyonu KTŞ'de aşınma tabakası için istenen alt ve üst limit şartlarını yerine getirmektedir [13]. Dizayn gradasyonu doğrultusunda hazırlanan agregalara uygulanan deneyler ve sonuçları, %4 SBS (Globalprene 3501) ile modifiye edilmiş B70/100 bitümlü bağlayıcının temel özellikleri ve karışımın efektif özgül ağırlığı aşağıda Çizelge 2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Karışım Gradasyonu.

Elek		Karışım Gradasyonu (%)	KGM Aşınma Tabak. Limitleri	
İnc/No	Boyut (mm)		Alt (%)	Üst (%)
1 ½"	37.5	100	100	100
1"	25	100	100	100
¾"	19	100	100	100
½"	12.5	91.6	88	100

3/8"	9.5	80.7	72	90
No. 4	4.75	46.7	42	52
No. 10	2	28.5	25	35
No. 40	0.425	14.2	10	20
No. 80	0.180	10.0	7	14
No. 200	0.075	6.3	3	8

Çizelge 1. Devamı.

Çizelge 2. Kaba ve ince agrega, filler, bitüm ve karışımın özellikleri.

Özellik	Birim	Sonuç	Test Metodu
<b>Kaba Agrega</b>			
Los Angeles aşınma kaybı	%	26	TS EN 1097-2 [22]
Yassılık indeksi	%	16	BS 812 [23]
MgSO <sub>4</sub> don kaybı	%	2.6	TS EN 1367-2 [24]
Soyulma mukavemeti	%	80-85	KTŞ Kısım 403 Ek-A [13]
Metilen mavisi	g/kg	0.5	TS EN 933-9 [25]
Hacim özgül ağırlığı	-	2.671	TS EN 1097-6 [26]
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.736	TS EN 1097-6 [26]
Absorpsiyonu	%	0.89	TS EN 1097-6 [26]
<b>İnce Agrega</b>			
Hacim özgül ağırlığı	-	2.665	TS EN 1097-6 [26]
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.747	TS EN 1097-6 [26]
Absorpsiyonu	%	1.13	TS EN 1097-6 [26]
<b>Filler</b>			
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.716	TS EN 1097-6 [26]
<b>Bağlayıcı (%4 Globalprene 3501 SBS + B70/100 Bitüm)</b>			
Özgül ağırlığı	-	1.01	TS EN 15326 [10]
Penetrasyonu (25°C)	0.1 mm	44	TS EN 1426 [12]
Yumuşama noktası	°C	72	TS EN 1427 [14]
Elastik geri dönme (25°C)	%	82	TS EN 13398 [15]
Parlama noktası	°C	220+	TS EN ISO 2592 [11]
DSR yenilme sıcaklığı	°C	92.3	TS EN 14770 [27]
<b>Karışım</b>			
Efektif özgül ağırlığı (deneyle)	-	2.706	ASTM D2041 [28]
Efektif özgül ağırlığı (hesapla)	-	2.705	ASTM D2041 [28]

Hazırlanan bu gradasyon ve seçilen bitüm tipi ile optimum bağlayıcı oranını tespit etmek için Marshall briketleri hazırlanmıştır. Kaba ve ince agrega, mineral filler ve bağlayıcı 160°C sıcaklıkta karıştırılmıştır ve elde edilen karışımın her iki yüzüne otomatik Marshall kompaktörü ile 75 darbe vurularak numuneler 150°C’de sıkıştırılmıştır. Karışımın toplam ağırlığının %4, %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5’i oranında bağlayıcı içeren 6 farklı numune hazırlanmıştır. Her bir bağlayıcı oranı için üçer adet aynı numune olmak üzere toplam 18 adet Marshall numunesi laboratuarda üretilmiştir.

Farklı bitüm yüzdeleri ile hazırlanan standart numunelerin (63.5 mm yükseklikte ve 101.6 mm çapında) statik yükleme altında mekanik ve hacimsel özelliklerini tespit etmek amacıyla ASTM D6927 [29] standartları (60°C sıcaklıkta 50.8mm/dak. deformasyon hızı olacak şekilde sabit yükleme) doğrultusunda Marshall testi yapılmıştır. Deney sonucunda her bir karışıma ait Marshall stabilite,



akma, agregalar arası boşluk oranı (VMA), bitümlü dolu boşluk oranı (VFB), boşluk oranı ve hacim özgül ağırlığı tespit edilmiş olup değişen bitüm oranlarına göre ilgili grafikler sırasıyla Şekil 4 (a), (b), (c), (d), (e) ve (f)'de gösterilmiştir.

Kırılma anındaki maksimum direnci ifade eden stabilitenin; bitüm miktarının artmasıyla önce arttığı, sonra zirve yaptığı ve sonra da düşüş eğilimine geçtiği görülmektedir. %5.5 bitüm kullanılması durumunda elde edilen en yüksek stabilite değeri (1697 kg); distorsiyon, deformasyon, tekerlek izi ve kesme gerilmesine karşı karışımın önemli bir dayanma gücünün olacağını işaret etmektedir. Her ne kadar en düşük (%4) ve en yüksek (%6.5) bitüm içeriğiyle hazırlanan Marshall numuneleri göreceli olarak daha düşük stabiliteli (1544 ve 1527 kg) olsa da KTŞ'de aşınma tabakası için belirtilen şartları yerine getirmektedir (min. 900 kg) [13].

Marshall numunesinin kırılma esnasındaki çökme ya da sıkışma oranı akma miktarı olup bu parametre beton asfalt kaplamalı yolların trafik yükleri altındaki plastik ve elastik davranışı hakkında önemli bir fikir vermektedir. KTŞ'de aşınma tabakası için hazırlanan numunelerin en az 2.00 mm en fazla ise 4.00 mm akma değerinde olması istenmektedir [13]. Bu çalışmadaki numunelerin akma miktarının en az 2.69 mm olduğu, artan bitüm yüzdesi ile birlikte neredeyse lineer bir şekilde yükseldiği ve en yüksek bitüm oranında 3.61 mm'ye ulaştığı görülmüştür.

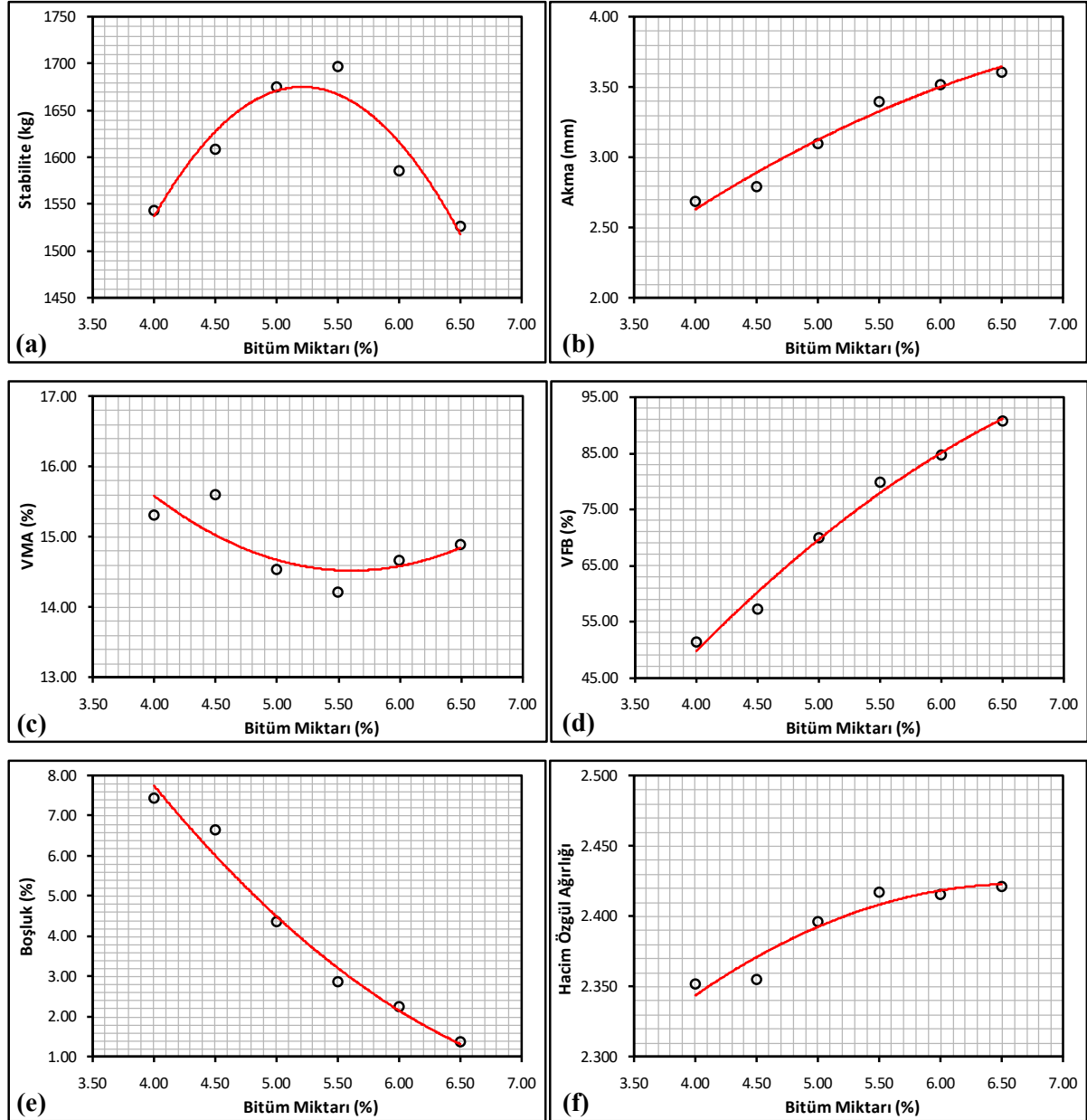
Marshall karışım tasarımında uygun bir VMA içeriğinin belirlenmesi, trafik yükleri altındaki esnek kaplamalarda kasma veya terleme eğilimi göstermeyecek yeterli bir bitümlü film kalınlığı elde edilmesi açısından çok önemlidir. Bu nedenle KTŞ; aşınma tabakası için hazırlanacak beton asfalt numunelerindeki agregalar arasındaki toplam intergranüler hava boşluğu hacminin (hava boşluğu hacmi + agregalarca tutulmamış bitüm hacmi) %14 ile %16 arasında olmasını şart koşmaktadır [13]. Şekil 4 (c)'de de görüleceği üzere bağlayıcı oranından bağımsız olarak bu çalışmadaki tüm numuneler bu şartı sağlamaktadır. Ancak bitüm oranının %4'den %5.5'e artırılması VMA'da bir düşüşe neden olurken %5.5'dan daha fazla bir bitümün kullanılması VMA'da küçük bir artışa yol açmaktadır.

VMA'nın efektif bitüm ile doldurulmuş kısmının oransal karşılığı olan VFB, diğer bir hacimsel parametredir. Bu çalışmadaki asfalt numunelerinde artan bağlayıcı miktarına karşılık VFB değerinde neredeyse doğrusal bir artış görülmüştür. %4 oranında bitüm kullanıldığında %51.3 VFB görülürken; bağlayıcı miktarının %0.5'er oranda artırılmasıyla VFB değeri %57.3, %70, %79.9, %84.7 ve %90.8 değerine yükselmiştir. Aşınma tabakasında kullanılacak beton asfalt numuneleri için VFB değerinin KTŞ'de %65 ile %75 arasında olması şart koşulduğu için bu koşulu sadece %5 oranında bağlayıcı içeren karışım yerine getirebilmektedir [13].

Bitümlü sıcak karışımların uygun bir hava boşluğu içerecek şekilde tasarlanması; karışımın nihai performansı, permabilitesi, durabilitesi ve stabilitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Yüksek orandaki bir boşluk; havanın ve suyun bitümlü karışıma daha fazla penetre olmasına ve dolayısıyla daha fazla hasarın oluşmasına sebep olabilmektedir. Diğer taraftan düşük bir boşluk oranı; özellikle sıcak iklimlerde ve ağır taşıt yükleri altında karışımdaki bağlayıcının yüzeye çıkmasına yani asfaltın kusmasına neden olabilmektedir. Sıkıştırılmış asfalt numunesindeki nihai hava boşluğu üzerinde birçok faktör etkili olabilmektedir ki bunlar arasında kullanılan bitümün miktarı ve cinsi ile mineral fillerin oranı ve türü büyük önem arz etmektedir [30]. Aşınma tabakası için dizayn edilecek numunelerin KTŞ'ye göre en az %3 en fazla ise %5 oranında bir hava boşluğu içermesi istenmektedir [13]. Bu çalışmadaki numunelerin hava boşluğunun, artan bitüm oranı ile hemen hemen doğrusal bir şekilde azaldığı ve en az %1.38 en fazla ise %7.45 oranında olduğu görülmüştür. Ayrıca hazırlanan numuneler içinde sadece %5 bağlayıcı karışımın KTŞ'de belirtilen hava boşluğu şartnamesini yerine getirdiği anlaşılmıştır.

Numelere ait hacim özgül ağırlığı değerleri incelendiğinde düzenli bir değişimin görülmediği ve yüksek bağlayıcı oranlarında daha kompakt karışımlar elde edileceği tespit edilmiştir (%4, %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 bitüm oranında sırasıyla 2.352, 2.355, 2.396, 2.417, 2.416 ve 2.421).

Sonuç olarak aşınma tabakasında kullanılması düşünülen beton asfaltın Marshall tasarım metoduna göre 2x75 darbeyle yapılan karışım dizaynında optimum bitüm oranı; kuru agregaya göre ağırlıkça %5.2 (100 gram kuru agrega + 5.2 gram modifiye bitüm) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Marshall grafikleri: Stabilite (a), akma (b), VMA (c), VFB (d), boşluk (e) ve hacim özgül ağırlığı (f).

#### 4. Sonuçlar

Soğuk iklimli bölgelerde servis sunan asfalt kaplamalı yollar için düşük sıcaklık çatlama önemli bir bozulma türü olup yüksek maliyetli bakım-onarım çalışmaları gerektirmektedir. Bu nedenle, birçok karayolu kuruluşu bu tür üstyapı sorunlarının miktarını ve şiddetini azaltacak ve asfalt yolların hizmet ömrünü uzatacak farklı ajanlar ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıları kullanmaya başladı. Bu noktadan yola çıkılarak bu çalışmada Türkiye’de kış mevsiminin belirgin olarak yaşandığı Bingöl İli örnek alınmış olup polimer modifikasyonun bitüm ve bitümlü sıcak karışım üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Bağlayıcı modifikasyonunda kullanılacak optimum polimer miktarını tayin etmek için B70/100 penetrasyon dereceli saf bitüm farklı oranlarda SBS (%4, %4.5 ve %5) ile modifiye edilmiştir.

- %4 SBS kullanılması halinde modifiye bitümün elastik geri dönme özelliğinde önemli ölçüde bir artış görülmüştür ki bu durum özellikle soğuk bölgelerde kullanılacak bağlayıcılar için arzu edilen bir durumdur.
- %4 SBS içerikli modifiye bitümün düşük sıcaklıklardaki eğilme sünme sertliğinin %4.5 ve %5 SBS içerikli modifiye bitümünki ile aynı olduğu anlaşılmıştır.
- Dünyada ve ülkemizde sıkça uygulanan bitüm performans deneyleri neticesinde %4 SBS ile modifiye edilmiş bitümün KGM teknik şartnamesinde PMB 76-28 için istenen şartları sağladığı anlaşılmıştır.
- %4 oranındaki SBS; bitümün reolojik özellerine kattığı iyileşmelere ilaveten daha az polimer kullanımını, daha az enerji tüketimini, dolayısıyla daha az gaz salınımını ve daha ekonomik ve çevre dostu bir bağlayıcı modifikasyonunu sağlayacaktır.
- Ayrıca 4% SBS ile modifiye edilmiş bitümün ağırlıkça %5.2 oranında kullanılması ile Marshall dizayn yöntemine göre hazırlanan asfalt karışım numunelerinin KTŞ'de asfalt aşınma tabakası için belirtilen şartları yerine getirdiği tespit edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda daha ekonomik, kolay erişilebilir, çevre dostu ve uzun ömürlü bir modifiye edici ajanın soğuk bölgelerdeki taş mastik asfalt kaplamalar üzerindeki etkisinin araştırılması planlanmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Gedik A. Esnek yol üstyapılarında bitüm ile birlikte bağlayıcı olarak optimum sülfür oranının ve performansının belirlenmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2016.
- [2] Yüknü K, Öztürk T, Komut M. Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı. Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2020.
- [3] Elseifi MA, Flintsch GW, Al-Qadi IL. Quantitative effect of elastomeric modification on binder performance at intermediate and high temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering 2003, 15(1): 32-40, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:1\(32\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(32)).
- [4] EAPA. Asphalt in Figures 2017, Total Production of Asphalt in Europe and EU-28 from 2001 to 2017, <https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017/>, 2017.
- [5] Oner J, Sengoz B, Rija SF, Topal A. Investigation of the rheological properties of elastomeric polymer-modified bitumen using warm-mix asphalt additives. Road Materials and Pavement Design 2017, 18.5: 1049-1066, <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1206484>.
- [6] Sengoz B, Isikyakar G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. Construction and Building Materials 2008, 22.9: 1897-1905, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>.
- [7] İskender E. Bentonit Nanokilinin Elastomerik ve Plastomerik Polimer Modifiye Bitümlerin Depolama Stabiliteleri Üzerindeki Etkisi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 7(3): 1187-1203, <https://doi.org/10.29130/dubited.511073>.
- [8] Gokalp İ, Çetin HM, Özinal Y, Gündoğan H, Uz VE. Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 8(2): 954-964, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.479148>.
- [9] Kalantar ZN, Karim MR, Mahrez A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. Construction and Building Materials 2012, 33: 55-62, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>.
- [10] TS EN 15326 2010. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yoğunluk ve özgül kütle tayini-Kapiler kapaklı piknometre yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [11] TS EN ISO 2592 2017. Petrol ve ilgili ürünler – Parlama ve yanma noktasının tayini - Cleveland açık kap yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [12] TS EN 1426 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

- [13] Karayolları Teknik Şartnamesi, KTŞ. Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
- [14] TS EN 1427 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [15] TS EN 13398 2018. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün elastik geri kazanımının belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [16] TS EN 12607-1 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 1: RTFOT yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [17] TS EN 14769 2012. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [18] Pavement Interactive. Fatigue Cracking, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/fatigue-cracking/>, 2021.
- [19] TS EN 14771 2012. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Eğilmede sünme rijitliğinin tayini - Eğilen giriş rheometresi (BBR), Türk Standartları Enstitüsü.
- [20] Deniz MT, Lav AH, Gedik A. Experimental investigation into the impact of compaction energy level on thickness of flexible pavement. *International Journal of Civil Engineering* 2021; 19(3): 357-368, <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00570-z>.
- [21] TS 3720 2010. Bitümlü karışımlar - Asfalt betonu - Karışım tasarımı hesap esasları - Marshall yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [22] TS EN 1097-2 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, Türk Standartları Enstitüsü.
- [23] BS 812 1999. Determination of flakiness of aggregates, British Standard.
- [24] TS EN 1367-2 2010. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [25] TS EN 933-9 2014. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 9: İnce tanelerin tayini- Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [26] TS EN 1097-6 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- [27] TS EN 14770 2012. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Karmaşık kesme modülü ve faz açısının tayini - Dinamik kesme rheometresi (DSR), Türk Standartları Enstitüsü.
- [28] ASTM D2041/D2041M-19. Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of asphalt mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, DOI: 10.1520/D2041\_D2041M-19.
- [29] ASTM D6927-15. Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, DOI: 10.1520/D6927-15.
- [30] Gedik A. An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials* 2021, 300: 123980, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>.