



## Kauçuk Modifiye Bitüm ve Kompozit Agregata ile Üretilen Asfalt Aşınma Tabakasının Şartname Limitleri Yönüyle Değerlendirilmesi

### Evaluation of the Asphalt Wearing Course Produced with Rubber Modified Bitumen and Composite Aggregate in Terms of Specification Limits

Abdulgazi Gedik<sup>1</sup>

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

**Başyuru/Received:** 18/10/2021

**Kabul/Accepted:** 26/04/2022

**Çevrimiçi Basım/Published Online:** 31/07/2022

**Son Versiyon/Final Version:** 31/07/2022

#### Öz

Doğal taş ocaklarından üretilen agregaların tedariki esnasında yaşanan birtakım kısıtlamalar ve zorluklar bitümlü sıcak karışım üretimini olumsuz yönde etkilemektedir. Farklı taş ocaklarından temin edilen agregaların bir arada kullanılmasının hem çevresel açıdan hem de doğal kaynakları daha efektif kullanmak açısından etkili olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada farklı iki ocaktan temin edilen bazalt ve kalker tipli agreganın kompozit agregata şeklinde asfalt betonu üretimindeki kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımda kullanılacak performans dereceli hedef bağlayıcıyı (KMB 76-16); saf B50/70 penetrasyon dereceli bitümün optimum miktarda (%10) kauçukla modifikasyonu sonucunda elde edilmiştir. Daha sonra bu bağlayıcı ve %55'i bazalttan %45'i kalkerden oluşan kompozit agreganın karışım tasarımı yapılmıştır. Asfalt aşınma tabakasında kullanılması düşünülen karışımlar Marshall dizayn yöntemine göre üretilmiştir. Kompozit agreganın karışım üzerindeki etkisini daha fazla anlamak için standart Marshall numunelerinin mekanik özellikleri (stabilite ve akma) ve hacimsel parametreleri (agregalar arası boşluk oranı, bağlayıcı ile dolu boşluk oranı, hava boşluk oranı ve hacim özgül ağırlığı) araştırılmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara göre; bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın %5.7 oranında kauçuk modifiyeli bitüm ile karıştırılmasıyla elde edilen asfalt betonunun Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) teknik şartnamesinde belirtilen kriterleri sağladığı ve aşınma tabakasında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

*“Bazalt, Kalker, Kompozit Agregata, Kauçuk Modifiyeli Bitüm, Asfalt Aşınma Tabakası”*

#### Abstract

Some restrictions and difficulties during the supply of aggregates from natural stone quarries adversely affect the production of hot bituminous mixture. It is thought that the combined use of aggregates obtained from different quarries may be effective both in terms of the environment and the efficacious use of natural resources. Therefore, this study investigated the incorporation of composite aggregate (basalt and limestone obtained from two different quarries) into asphalt concrete. The target performance graded binder (KMB 76-16) was obtained by modification of pure B50/70 bitumen with optimum amount (10%) of rubber. Then, a mixture design with this binder and composite aggregate (55% basalt and 45% limestone) was made. The mixtures to be used in the asphalt wear layer were produced according to the Marshall method. To further understand the effect of composite aggregate, mechanical properties (stability and flow) and volumetric parameters (voids in mineral aggregate, voids filled with binder, air void and volume specific gravity) of standard Marshall samples were investigated. The results indicate that the asphalt concrete with composite aggregate (basalt and limestone) and 5.7% rubber modified bitumen meets the criteria stated in the Turkish General Directorate of Highways' (KGM) specifications and can be used in the wearing course.

#### Key Words

*“Basalt, Limestone, Composite Aggregate, Rubber Modified Bitumen, Asphalt Wearing Course”*

## 1. Giriş

Asya, Avrupa ve Afrika kıtasının birbirine en fazla yaklaştığı yerde bulunan Türkiye jeopolitik açıdan lojistik bir üs konumundadır. Bölünmüş karayolu ağı, konvansiyonel ve yüksek hızlı demiryolu ağı, hinterlandı geniş limanları ve dünyanın birçok ülkesine uluslararası sefer düzenleyen geniş uçuş filosu ile Türkiye ulaştırma sektöründe lider ülkeler arasında yer almaktadır. Karayolu ulaşımı; sunduğu esneklik nedeniyle gerek yolcu gerekse yük taşımacılığı alanında Türkiye’de ulaştırma sektörleri arasında en çok tercih edilen çeşittir. Karayoluna gösterilen bu talep artışını karşılayabilmek için Türkiye’de son yıllarda bölünmüş yol yapım çalışmalarına ve dolayısıyla karayolu üstyapı imalatlarına büyük bir hız verilmiştir. Karayollarının yapımı, bakımı, onarımı ve işletmesinden sorumlu olan Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) 2021 yılı verilerine göre Türkiye’nin karayolu ağı toplam 68633 kilometre uzunluğunda olup bu yolların 27320 km’si beton asfalt ile 37922 km’si sathi kaplama ile kalanı ise çeşitli üstyapı malzemeleri ile kaplıdır (KGM, 2021).

Bitümlü sıcak karışım; taş ocağında üretilmiş, kırılmış ve elenmiş belirli boyutta ve belirli bir fraksiyondaki kaba agregaya, ince agregaya ve fillerin bitümlü bir bağlayıcı ile sıcak asfalt plentinde karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Pahalı bir imalat olan bu karışımların herhangi bir bakım onarım çalışmasına ihtiyaç duymadan uzun yıllar hizmet verebilmesi için ilgili teknik şartnameler doğrultusunda çok iyi ve sorunsuz bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Kullanılacağı üstyapı tabakasına (aşınma, binder ve bitümlü temel) ve özelliğine bağlı olarak değişmekle birlikte beton asfalt; genel olarak yaklaşık %95 oranında agregaya (kaba ve ince) ve filler, %5 oranında ise asfalt çimentosu içermektedir. Her ne kadar maliyet ve performans anlamında bağlayıcının karışım üzerindeki rolü çok etkin olsa da büyük ölçekte kullanılan kaba ve ince agreganın önemi yadsınamayacak derecede yüksektir.

Türkiye Cumhuriyeti, Ticaret Bakanlığı, Maden Metal ve Orman Ürünleri Dairesi tarafından 2021 yılında hazırlanan Doğal Taşlar Sektör Raporu’na göre Türkiye’de yaklaşık 1500 adet doğal taş ocağı bulunmaktadır (Türkiye Ticaret Bakanlığı, 2021). Ülkemizde bulunan bu ocaklardaki kayaçlar jeolojik yapılarına göre volkanik, tortul ve metamorfik olmak üzere 3 temel grupta kategorize edilmektedir. Başlıca volkanik kayaç tipleri; granit, siyenit, diyorit, bazalt, diyabaz ve gabro tortul kayaç tipleri; kalker, kumtaşı, çört ve tortulu şist metamorfik kayaç tipleri ise gnays, şist, kayağantaşı, kuvarsit, mermer ve serpantindir (Roberts vd., 1996). Bu kayaç tipleri içerisinde ülkemizde asfalt betonu üretiminde en çok kullanılanlar bazalt, kalker ve kumtaşıdır.

Yaygın bir volkanik kayaç tipi olan bazalt; siyah renkte ve kesif yığınlar halinde olup doğada genellikle kütle, damar ve akıntı halinde bulunmaktadır (Wikipedia, 2021). Sert ve yüksek aşınma dirençli bu kayaç, dünyanın çoğu yerinde bol miktarda bulunması itibariyle karayolu ve demiryolu üstyapısında sıkça kullanılmaktadır. Morfolojik olarak veziküler dokuda olan bazalt çok hızlı bir şekilde erimiş kayaların soğuması nedeniyle ince taneli mineral bir doku içermektedir. Kimyasal olarak MgO ve CaO açısından zengin, Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O bakımından ise fakir olup genellikle %45-53 oranında SiO<sub>2</sub> içermektedir (USGS, 2018). Bazaltın ortalama yoğunluğu yaklaşık 3.0 t/m<sup>3</sup>’dür.

Kireç taşı olarak da bilinen kalker; Türkiye’de çok yaygın bir kayaç tipi olup Türkiye coğrafyasının yaklaşık %20’sini kaplamaktadır (Varış, 2019). Yaklaşık %90 oranında kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) içeren kalker az miktarda da magnezyum karbonat (MgCO<sub>3</sub>) içermektedir. Beyaz-gri renkte olan kalkerin yoğunluğu poroz yapısına bağlı olarak 1.5 ile 2.7 t/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Uzun ömürlü olması, dış etkenlere karşı yüksek dirençli olması, ucuz ve kolay erişilebilir olması nedeniyle kalker inşaat sektörünün birçok alanında tercih edilmektedir. Ülkemizde özellikle beton ve asfalt üretiminde sıkça kullanılmaktadır.

Diğer bir tortul kayaç tipi olan kumtaşı genellikle boyutu 0.0625 ile 2 mm arasında değişen danelerin doğal bir çimento ile bağlanmasıyla oluşmuştur. Kuvars ve feldispat içerikli olması nedeniyle kumtaşının hava koşullarına karşı direnci yüksektir. Dolayısıyla inşaat sektörünün birçok alanında olduğu gibi bitümlü sıcak karışım üretiminde de kumtaşı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beton asfalt üretiminde kullanılacak agregaların jeolojik olarak aynı kökenli olması her ne kadar çok arzu edilse de bu durum günümüzde bazen pek mümkün olamamaktadır. Bilhassa taş ocağı sayısı ile rezervinin kısıtlı olduğu ve ruhsatlandırma işlemlerinin daha zor olduğu şehirleşme alanları ile taş ocağı-plent-işyeri arasındaki taşıma mesafelerinin fazla olduğu ve ulaşımında diğer zorlukların ve aksamaların yaşandığı metropolitan alanları tek tip agregaya üretimi için pek elverişli değildir. Dolayısıyla ihtiyacın çok fazla olduğu bu tür yerlerde, farklı taş ocaklarından temin edilen farklı menşeli agregaların belli oranlarda bir araya getirilerek bitümlü sıcak karışım üretiminde kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında iki farklı ocakta üretilen bazalt ve kalkerin kompozit agregaya şeklinde kauçukla modifiye edilmiş bitümlü birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda bağlayıcı modifikasyonunda kullanılacak optimum kauçuk oranı belirlendikten sonra asfalt aşınma tabakası dizaynı için kompozit agregalı karışımların bitüm içerikleri ve diğer teknik özellikleri laboratuvarında tespit edilmiştir. Daha sonra mekanik (stabilite ve akma) ve hacimsel (boşluk oranları ve yoğunluk) parametreleri hesaplanan bu karışımların ilgili teknik şartnamelere uygunluğu araştırılmıştır.

## 2. Literatür Taraması

Önceki çalışmalarda farklı kayaç tiplerinin kombine olarak kullanımının bitümlü mastik seviyesinde, agregaya seviyesinde ve bitümlü sıcak karışım seviyesindeki etkileri araştırılmıştır.

Mastik seviyesinde yapılan bir çalışmada; bazalt + sönmüş kireç ve bazalt + uçucu külün mineral filler olarak kullanımı yaşlanma ve kırılma mekaniği açısından incelenmiştir (Das&Singh, 2019). Sönmüş kireç ve uçucu külün farklı özellikleri (yapısı, yüzey dokusu, mineralojisi ve etkileşim kapasitesi) bitümlü mastiklerin performansını değişik şekilde etkilemekle birlikte sönmüş kirecin bazaltla birlikte kullanımı uçucu külün bazaltla birlikte kullanımına nazaran mastiğin yaşlanma ve kırılma direncinde daha fazla artışa yol açmıştır.

Maiah ve Al-Khateeb (2012) bazalt ve kalkerin birlikte kullanımının Superpave agregası özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışma toplam agregadaki bazalt oranının hem iri hem de ince agregalar için özgül ağırlık ve absorpsiyon değişikliği üzerinde kaydedeğer bir fark oluşturmadığını göstermiştir. Ancak bazalt miktarındaki artış, yassı ve uzun dane miktarı ile Los Angeles aşınma miktarında önemli bir düşüşe yol açarken kaba agregası açısallığı ve kum eşdeğerliliğinde büyük bir artışa yol açmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada nihai agregası karışımındaki bazalt miktarının çok etkili olduğu ve bazaltın kalker ile birlikte kullanımının beton asfalt özellikleri üzerinde önemli değişiklikler doğuracağı kanaatine varılmıştır.

Sönmez vd. (2009) tarafından İstanbul bölgesinde yapılan bir araştırmada bazalt, kalker, kumtaşı ve doğal kumdan oluşan kompozit agregalar beton asfalt üretiminde kullanılmıştır. Bu araştırmada kaba agregası bazalt olan bitümlü sıcak karışımın bağlayıcı miktarının daha az; yoğunluğunun ve bitümlü dolu boşluk yüzdesinin ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaba agregası kalker olan karışımlarda ise hava boşluğu, Marshall stabilitesi ve akma değerinin bazalt içerikli karışımlardakine nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kumtaşı ile yapılan karışımlara ait hava boşluğu bazalt ve kalkerli karışımlara göre daha yüksek iken Marshall stabilitesi ve akma değerinin gerek bazalt gerekse kalker içerikli karışımlardan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Özet olarak; bu çalışma ile İstanbul gibi büyük şehirlerde kısıtlı rezerv ve artan ihtiyaç nedeniyle farklı menşeli agregaların beton asfalt imalatında birlikte kullanılmasının önemi vurgulanmıştır.

Cao vd. (2013) bazalt ve kalkerden yapılan taş mastik asfaltın (TMA) yüksek sıcaklık özelliklerini incelemiştir. Kaba ve ince bazalt agregalı TMA (B-TMA), kaba ve ince kalker agregalı TMA (K-TMA) ile kaba bazalt agregası ve ince kalker agregalı TMA (BK-TMA) olmak üzere 3 farklı tipte karışım hazırlanmıştır. Eğilme sünme testi sonuçları doğrultusunda kurulan Burger modeline göre yüksek sıcaklıkta en iyi performansı saf bazalt içerikli TMA (B-TMA) sergilemiş olup onu BK-TMA ve K-TMA izlemiştir. Eğilme sünme oranına göre yapılan varyans analizi B-TMA ve BK-TMA'nın yüksek sıcaklık davranışı arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermişken; K-TMA ve BK-TMA arasında ise önemli bir farkın olmadığını göstermiştir. TMA'lardaki bazalt miktarını azaltmayı hedefleyen bir başka çalışmada Iskender (2013) kaba agregası tamamıyla bazalt, ince agregası ve mineral fillerini bazalt + kalkerden oluşan 4 farklı fraksiyondaki TMA'larda tekerlek izi performansını ölçmüştür. Laboratoire Central des et Chausées (LCPC) tekerlek izi ölçüm cihazı ile yapılan sonuçlara göre TMA'larda kalkerin ince agregası veya filler olarak miktarının artırılması tekerlek izi dayanımında sadece ihmal edilecek düzeyde (%0.24 - %0.41) düşüşlere neden olmuştur.

Kong vd. (2017) bazalt, kalker ve andezit agregalarından oluşan farklı kombinasyonlardaki kompozit agregaların bitümlü temel tabakasında (BTT) kullanılabilirliğini hacimsel ve mekanik açıdan araştırmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre; saf kalkerin kaba ve ince agregası olarak kullanımı BTT'nin boşluk oranını efektif bir şekilde azaltırken; bazalt + kalker içerikli BTT'de kalker oranının artması boşluk oranının azalmasında önemli ölçüde etkili olabilmektedir. Ancak bazalt + andezitten yapılan BTT'de andezit oranının artması karışımın hacimsel özelliklerinde herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır. Marshall stabilite testi, 4 nokta bükülme testi ve donma-çözülme yarıma testi; alkali kaba agregası kullanımının BTT'nin mekaniksel özelliklerinde iyileşmeler sağladığını; bazalt ile kalkerin birlikte kullanımının ise BTT'nin direncini büyük ölçüde artırdığını ortaya koymuştur.

Kalkerden yapılan ve böylece %30 daha az maliyetli poroz asfalt beton, bazaltla yapılanına göre hemen hemen aynı derecede fonksiyonel olsa da daha iyi bir performans sergileyememiştir. Zhou vd. (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre kalkerli poroz asfaltın performansını arttırmak için düşük yassılık oranlı ve düşük ufalanma değerli kübik şekilli agregaların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca kalker içerikli poroz asfalt için Marshall üretim sıcaklığının 155°C, sıkıştırma darbe sayısının ise 35 olması önerilmiştir.

### 3. Modifiye Bağlayıcı Hazırlama ve Yöntemi

TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B50/70 penetrasyon dereceli geleneksel asfalt çimentosu bu deneysel çalışmada temel bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bağlayıcı modifikasyonunda modifiye edici ajan olarak seçilen kauçuk, saf bağlayıcının ağırlıkça üç farklı yüzdesi oranında (%8, %10 ve %12) kullanılmıştır. Bu kauçuk oranları ile modifiye edilmiş bitümlere, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak uygulanan bağlayıcı deneyleri tatbik edilmiştir ve bu bağlayıcıların Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) tarafından KMB 76-16 için belirtilen kriterlere uygunluğu araştırılmıştır.

400 gram ağırlığındaki saf B50/70 penetrasyonlu bitüm fırında akıcı hale gelene kadar 160°C sabit sıcaklıkta 1 saat ısıtılmıştır. %8, %10 ve %12 oranında ilave edilecek kauçuk miktarları hassas dijital terazide ölçülerek hazırlanmıştır. Daha sonra kauçuk, geleneksel bağlayıcıya homojen dağılım sağlayacak şekilde eklenmiştir ve modifiye bitüm numuneleri elektromekanik bir blendirde 165°C sabit sıcaklıkta ve 1000 dakika/devir sabit karıştırma hızında hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi esnasında ortaya çıkabilecek herhangi bir buharlaşmayı, oksitlenmeyi ve yaşlanmayı asgari düzeyde tutabilmek için ve ayrıca sabit ısı bir karıştırma ortamı elde edebilmek için karışım süresince elektromekanik blendirin üzeri bir kapak ile kapatılmıştır. Böylece karışımın ortam havasıyla olan teması minimum

düzye indirgenmiştir. Karıştırma işleminde sonra elde edilen numuneler ağızları sıkıca kapatılan cam şişelerde gün ışığından ve ısıdan etkilenmeyecek şekilde kapalı bir ortamda muhafaza edilmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlarda hem kısa sürede hem de uzun sürede yaşlanma görülmektedir. Kısa vadede yaşlanma daha çok karışımın asfalt plentinde üretilmesi, işyerine taşınması ve serilip sıkıştırılması esnasında oluşurken; uzun vadede yaşlanma hizmete açılmış yollardaki kaplamaların gerek trafik yüklerine gerekse çevresel faktörlere maruz kalması nedeniyle oluşmaktadır (Huang, 2008). Karışımdaki bağlayıcının yaşlanması, oksidatif etkenlere maruz kalan bitümdeki çeşitli uçucu bileşenlerin bozulması ve diğer bileşenlere dönüşmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bağlayıcının ısıtılması ve asfalt plentinde sıcak agregayla karışımı esnasındaki oksidasyon ve buharlaşma kaynaklı yaşlanmayı laboratuvar ortamında simüle etmek için bir takım kısa vadeli yaşlandırma deneyleri bulunmaktadır. Bu çalışmadaki numuneler, TS EN 12607-1 standartları (8 adet şişeye yerleştirilmiş 35 gram ağırlığındaki her bir bağlayıcının 85 dakika 163°C'de 15±0.2 devir/dakika hızla döndürülerek ısıtılması) doğrultusunda uygulanan döner ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile kısa vadede yaşlandırılmıştır. Hizmette açılmış asfalt kaplamalı bir yolun servis ömrü süresince bağlayıcısının maruz kalacağı uzun süreli yaşlanmayı laboratuvar ortamında simüle etmek için çeşitli uzun vadeli yaşlandırma deneyleri bulunmaktadır. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılan basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bu çalışmada daha önceden RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır. PAV ile uzun vadede yaşlandırma, TS EN 14769 standartları doğrultusunda 10 tane 3.2 mm film kalınlığına sahip 50 gram ağırlığındaki bağlayıcının 100°C'de 2.1 MPa basınca 20 saat maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4. Bağlayıcı Deneyleri

Kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcılara; orijinal durumda, RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra ve RTFOT+PAV ile yaşlandırıldıktan sonra hem geleneksel hem de yeni nesil performans deneyleri uygulanmıştır.

##### 4.1. Taze bağlayıcı deneyleri

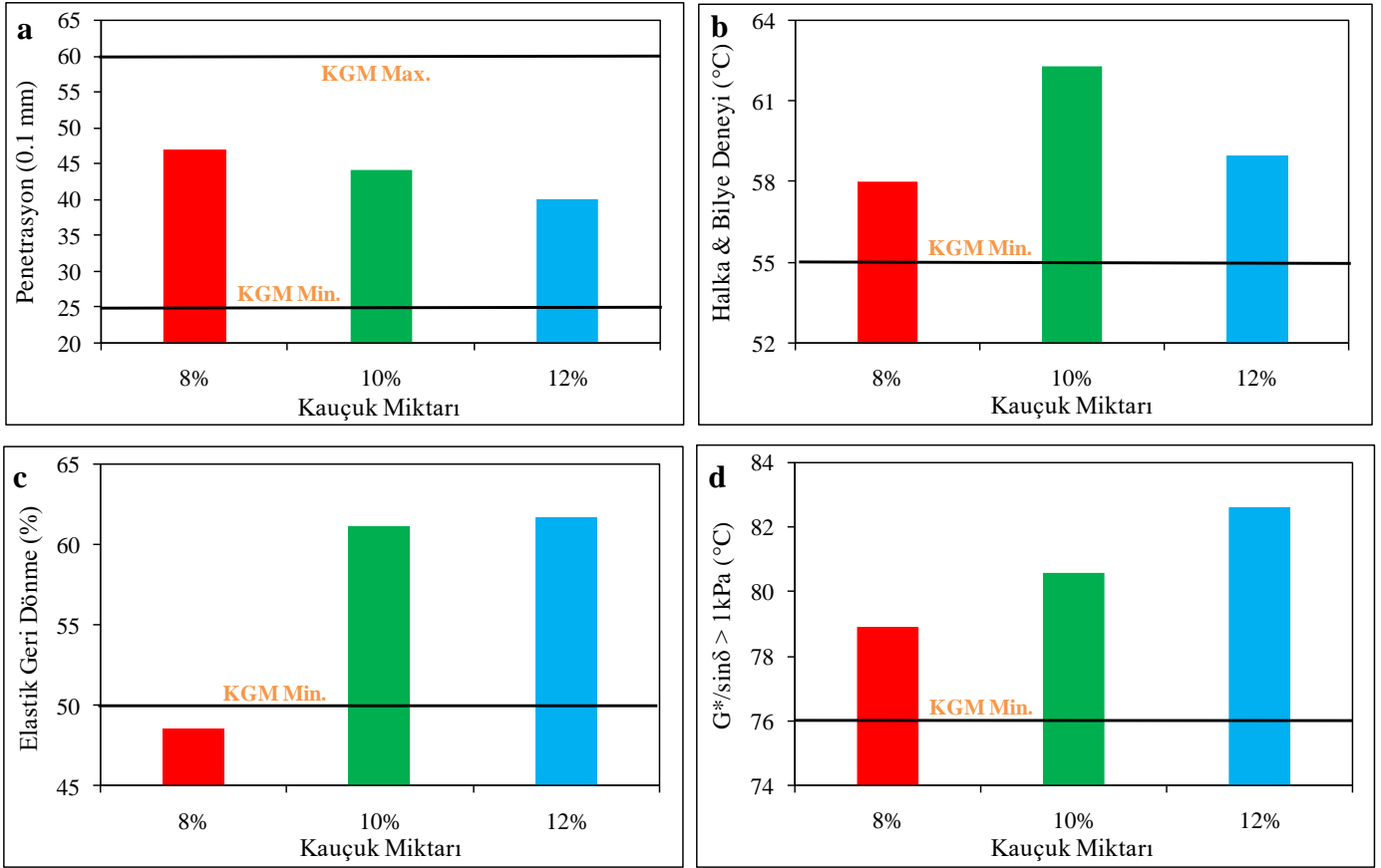
Orijinal numunelerin standart özelliklerini tayin etmek için parlama noktası, özgül ağırlık, penetrasyon testi, halka & bilye deneyi ve elastik geri dönme testi; viskoelastik performansını tayin etmek için Dinamik Kesme Reometresi (DSR) testi tatbik edilmiştir.

TS EN ISO 2592 ve TS EN 15326 standartlarına göre uygulanan parlama noktası ve özgül ağırlık deneyi; modifiye edilmiş her bir bağlayıcının kauçuk oranından bağımsız olarak 240°C'nin üzerinde bir parlama noktasına ve 1.04 özgül ağırlığa sahip olduğunu göstermiştir. KTŞ, KMB 76-16 bağlayıcı sınıfı için özgül ağırlık değerinin 1.0 ile 1.1 arasında olmasını; parlama noktasının ise en az 220°C olmasını şart koşmaktadır ki bu çalışmadaki %8, %10 ve %12 kauçuk içeren her bir bağlayıcı bu iki şartı da yerine getirmektedir.

TS EN 1426 standartlarına göre 5 saniye süresince 100 gram ağırlığındaki standart bir iğnenin 25°C'de su banyosundaki %8, %10 ve %12 kauçuklu modifiye bağlayıcılara batma derinliği olarak okunan penetrasyon değerleri Şekil 1 (a)'da gösterilmiştir. Penetrasyon okumalarının artan kauçuk miktarı ile uyumlu bir şekilde azaldığı, bir başka deyişle bağlayıcı kıvamının arttığı görülmektedir. %8 kauçuk içeren modifiye bağlayıcının penetrasyonu 47 d-mm iken, kauçuk oranının ilave %2 oranında artırılması penetrasyonda 3 ve 7 d-mm'lik düşüşe yol açmıştır (10% ve 12% kauçuk içeren bağlayıcılar için sırayla 44 d-mm ve 40 d-mm). Şekil 1 (a)'dan da anlaşılacağı üzere KTŞ tarafından KMB 76-16 bağlayıcı için belirlenen alt ve üst penetrasyon sınır değeri 25 d-mm ve 60 d-mm olup bu çalışmadaki her bir KMB için okunan penetrasyon derecesi bu limit değerler içinde kalmaktadır.

Yumuşama noktası deneyi olarak da bilinen halka & bilye testi bağlayıcı viskozitesinin indirekt bir ölçümüdür. Bitümlü bağlayıcıların özellikle yüksek sıcaklıklardaki direnci hakkında fikir veren bu test; saf su veya gliserin banyosunda ısıtılmakta olan numunenin yumuşayarak 3.5 gram ağırlığındaki standart çelik bilyeleri artık taşıyamaz hale geldiği andaki sıcaklığı belirlemektedir. Bu çalışmada TS EN 1427 standartları doğrultusunda yapılan teste ait sonuçlar Şekil 1 (b)'de verilmektedir. Artan kauçuk oranı ile yumuşama noktası değerinde düzenli bir değişimin olmadığı görülmektedir. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren KMB'nin yumuşama noktası sırasıyla 58°C, 62.3°C ve 59°C'dir. Elde edilen her bir değer KTŞ tarafından KMB 76-16 için belirlenen alt değer şartını ( $\geq 55^\circ\text{C}$ ) yerine getirebilmekle birlikte %10 kauçuklu bağlayıcının yüksek sıcaklıklara karşı daha az duyarlı olacağı anlaşılmaktadır. Bu çalışmadaki sonuçlara benzer şekilde Radziszewski vd. (2004) yumuşama noktasının kauçuk modifikasyonu ile 65°C'ye kadar yükselebileceğini göstermiştir.

Vizkoelastik davranış sergileyen ve termoplastik bir ürün olan asfalt çimentosu; yüklemenin miktarına, süresine ve sıcaklığına bağlı olarak tekrarlayan trafik yükleri altında farklı özellikler sergileyebilmektedir. Yüksek yüklenme hızında deformasyona uğrayan bağlayıcı, üzerindeki yük kaldırıldığında elastik davranış göstererek yüklenmeden önceki ilk haline geri gelebilmektedir. Bağlayıcının bu elastik özelliği, malzemenin yorulma direncinin ölçülmesi ve herhangi bir çatlak ya da bozulma olmaksızın büyük ölçekli basınçları ne kadar sönmüleyebileceğinin bir göstergesidir. Yapısal özelliği itibarıyla kauçuk, bağlayıcı ile birlikte kullanılması durumunda bitüme önemli miktarda elastik özellik katabilmektedir. Bu çalışmadaki KMB'lere TS EN 13398 standartlarında yapılan elastik geri dönme test sonuçları Şekil 1 (c)'de gösterilmektedir. %8 kauçuk içerikli KMB; KTŞ tarafından belirlenen minimum elastik geri dönme şartını ( $\geq 55$ ) sağlayamazken kauçuk miktarının artırılması KMB 76-16 için hedeflenen elastik özelliği kazandırabilmektedir. %10 ve %12 kauçuklu KMB için elastik geri dönme %61.1 ve %61.7 olup bu iki bağlayıcı arasındaki fark ihmal edilecek kadar azdır. Geçmişteki bir çalışmada kauçuğun bitüme eklenmesiyle elastik geri dönüşün %5-10'dan yaklaşık %75'e kadar artabileceği gösterilmiştir (Pilat vd., 2000).



Şekil 1. Taze Numunelere Ait (a) Penetrasyon; (b) Halka & Bilye Deneysi; (c) Elastik Geri Dönme; (d) DSR Yenilme Sıcaklığı.

Servise açılmasıyla birlikte saf bağlayıcı içeren asfalt kaplamalı yollarda kısa bir süre sonra tekerlek izi bozulmaları sıkça görülmektedir. Tekrarlayan trafik yükleri bu tür üstyapılarda ilave konsolidasyonlara, bu da özellikle ağır tonajlı taşıtların seyrettiği sağ şeritte oluklanmalara neden olmaktadır. Sürüş konforunu ve güvenliğini önemli ölçüde azaltan tekerlek izi, esnek üstyapılı yollarda görülen ciddi bir kalıcı deformasyon türüdür. Serme-sıkıştırma kalitesi, kaplama kalınlığı, karışım tasarımı, agrega çeşidi ve dokusu gibi birçok etken tekerlek izi oluşumunda rol oynasa da bitümlü bağlayıcının çeşidi, performans derecesi ve miktarı büyük önem arz etmektedir (Bahia&Anderson, 1995a; Roberts vd., 1996; Zaniewski&Pumphrey, 2004). Artan sıcaklıklarda beton asfalttaki bağlayıcının daha akışkan hale geldiği göz önünde bulundurulduğunda, tekerlek izi oluşumunu engellemek için bağlayıcının bilhassa yüksek sıcaklıklardaki reolojik davranışının incelenmesi gerekmektedir. DSR olarak da bilinen Dinamik Kesme Reometresi testi; birçok malzemenin araştırma, geliştirme ve kalite kontrolünde kullanıldığı gibi modifiye bitümlü bağlayıcıların performansını belirlemek için de kullanılmaktadır. 1993'den günümüze dek Superpave tarafından kullanılan DSR; asfalt çimentosunun hem katı halde hem de erimiş haldeki reolojik davranışlarını anlamak ve karakterize etmek için tüm dünyada sıkça uygulanan bir deneydir. Bu deney genel olarak 10 ile 150°C arasında uygulanmakta olup bitümlü bağlayıcının istenen sıcaklıklardaki kompleks modülünü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) ölçmektedir. Bu iki verinin kullanılmasıyla tekerlek izi parametresi ( $G^*/\sin\delta$ ) hesaplanmaktadır. Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından geliştirilen ve ülkemizde KGM tarafından da kullanılan bu parametrenin; orijinal bitümler için 1.59Hz frekansında yapılan DSR testinde en az 1.0 kPa olması istenmektedir. Bu şartın sağlandığı yenilme sıcaklıkları Şekil 1 (d)'de gösterilmektedir. KTS, KMB 76-16 için sınır değer en az 76°C olmasını şart koşmakta olup bu çalışmadaki kauçuk ile modifiye edilmiş her bir bitümün bu şartı yerine getirdiği görülmektedir (%8, %10 ve %12 kauçuk içerikli KMB'ler için yenilme sıcaklıkları sırasıyla 78.9°C, 80.6°C ve 82.6°C'dir).

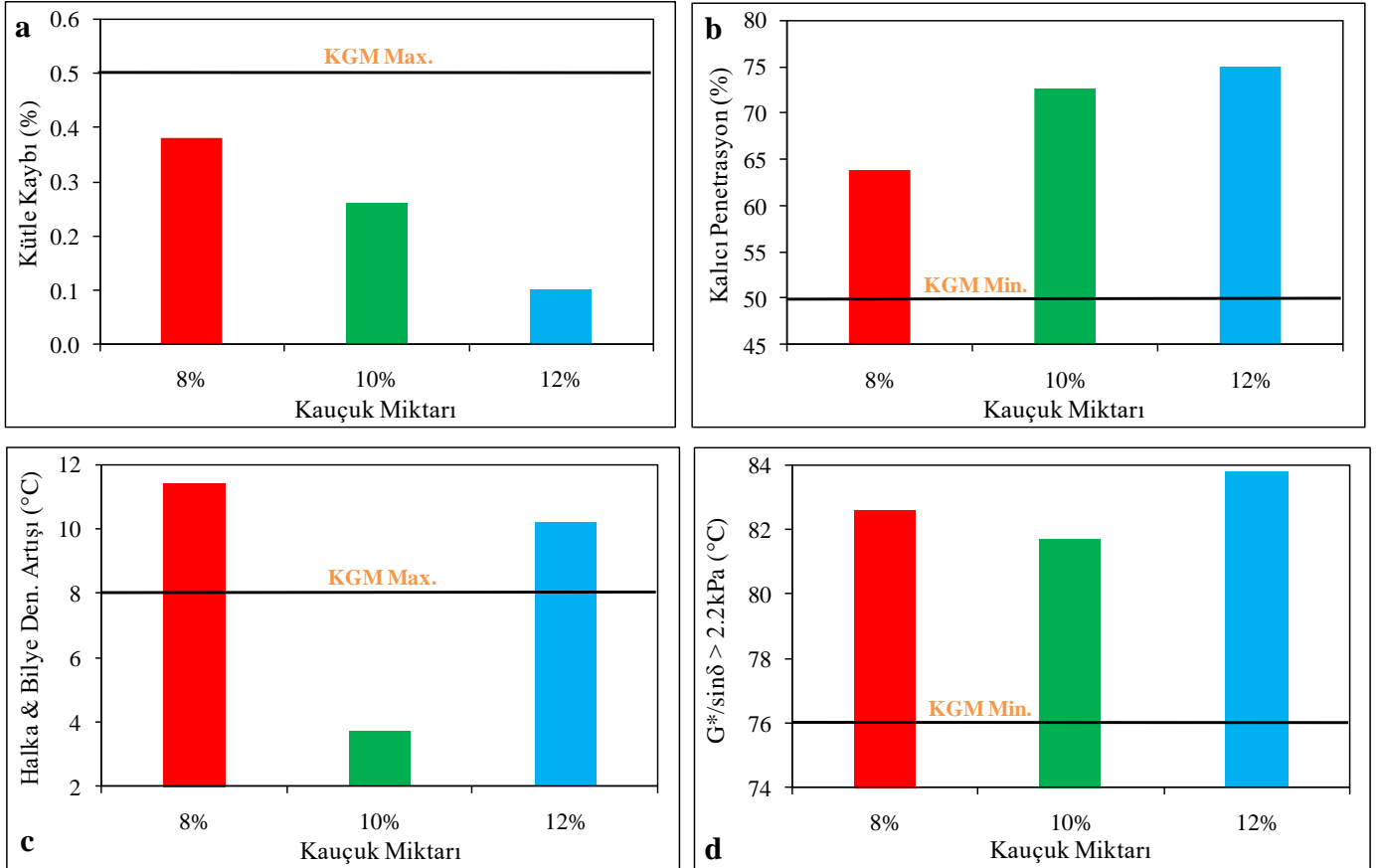
#### 4.2. RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı deneyleri

Beton asfalt üretimi ve serme-sıkıştırma işlemleri sırasında bağlayıcıda meydana gelebilecek olası kütle kaybı RTFOT deneyi esnasındaki kütle değişimi ile öngörülebilmektedir. Bu çalışmadaki numunelerde kısa vadede yaşlandırma işlemi nedeniyle meydana gelen kütle kaybı Şekil 2 (a)'da gösterilmiştir. Kauçuk miktarının artırılması bitümün içindeki hafif ve uçucu maddelerin yaşlanmaya bağlı kaybını azaltmaktadır. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren numunelerde sırasıyla %0.38, %0.26 ve %0.1 kütle kaybı görülmüş olup bu değerlerin her biri KTS tarafından belirlenen maksimum değer (%0.5) altında kalmaktadır.

Yaşlanma nedeniyle bağlayıcıların kıvamındaki artış, bitümün maruz kaldığı ısı ve karıştırma süresine bağlı olarak değişmekte olup ilk penetrasyon değerlerinde 30, 40 veya 50 d-mm'ye kadar düşüşler görülebilmektedir. Ancak diğer uluslararası şartnamelerde de

belirtildiği üzere KTŞ yaşlanma sonrası kalıcı penetrasyon oranının en az %50 olmasını şart koşmaktadır. Şekil 2 (b)'de de görüleceği üzere bu çalışmadaki nihai penetrasyon değerleri artan kauçuk değeri ile artmakta olup (%8, %10 ve %12 kauçuk için %63.8, %72.7 ve %75) alt limit şartını yerine getirmektedir.

Kısa vadede yaşlandırma Şekil 2 (c)'de de görüleceği üzere; düşük (%8) ve yüksek (%12) miktarda kauçuklu bağlayıcıların halka & bilye değerinde önemli bir artışa (11.4 ve 10.2°C) yol açarken orta düzeyde (%10) kauçuklu bağlayıcılarda nispeten daha az bir artışa (3.7°C) neden olmuştur. KTŞ, RTFOT yaşlandırması sonrasında KMB 76-16 bitüm sınıfı için yumuşama noktasındaki artışın en fazla 8°C; azalmanın ise en fazla 2°C olmasını şart koşmaktadır. İstenen limit değerlerini bu çalışmada sadece %10 kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcı sağlayabilmektedir.



Şekil 2. RTFOT ile Yaşlandırılmış Numunelere Ait (a) Kütle Kaybı; (b) Kalıcı Penetrasyon; (c) Halka & Bilye Deneyindeki Artış; (d) DSR Yenilme Sıcaklığı.

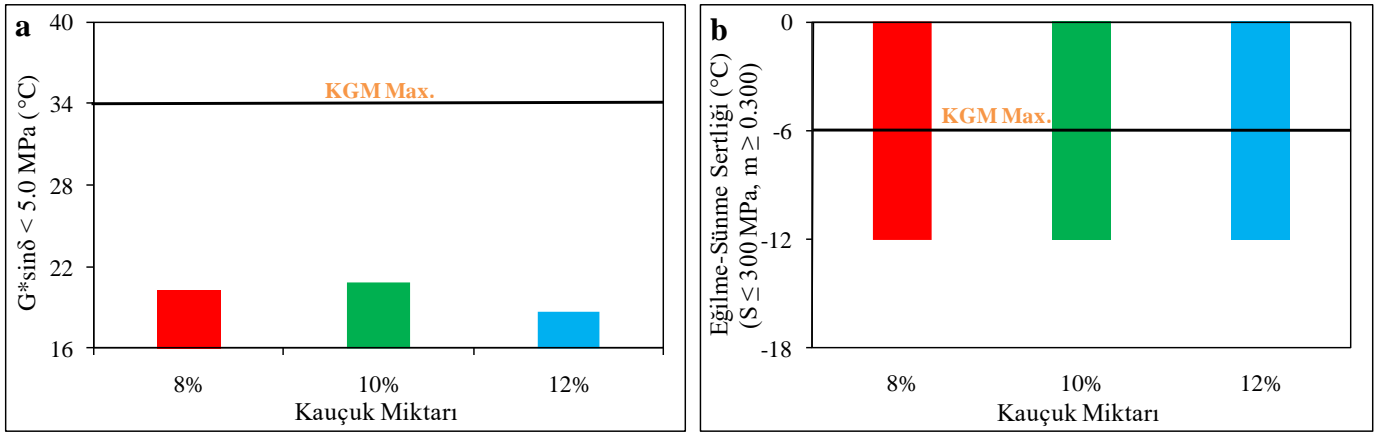
Tekrarlanan ağır tonajlı trafik yükü altındaki asfalt çimentosu sıcak iklimli bölgelerde viskoz davranış sergileyebilmektedir. Özellikle yüksek servis sıcaklıklarında asfalt kaplamadaki bağlayıcının karışım içindeki boşluklara geçmesiyle tekerlek izi deformasyonunda artışlar görülebilmektedir. Bu artışları engellemek/minimize etmek için SHRP, tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) kısa vadede yaşlandırılmış bağlayıcılar için 1.59Hz frekansta uygulanan DSR testinde 2.2 kPa'dan büyük olmasını istemektedir. KGM tarafından da kabul edilen bu şartın yerine geldiği minimum yenilme sıcaklıkları Şekil 2 (d)'de gösterilmektedir. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren RTFOT ile yaşlandırılmış numunelerin yenilme sıcaklıkları sırayla 82.6°C, 81.7°C ve 83.8°C olup bu değerlerin her biri KTŞ'de KMB 76-16 için belirlenen minimum şartı (76°C) yerine getirmektedir. Ayrıca Kalabinska vd. (1999) kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yaklaşık 90°C'ye kadar geniş bir viskoelastisite sıcaklık aralığına sahip olabileceğini belirtmiştir.

#### 4.3. RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı deneyleri

Timsah sırtı çatlaması olarak da bilinen yorulma çatlaması trafiğe açılmış asfalt kaplamalı yollarda sıkça görülen bir bozulma türüdür. Çevresel faktörler, kaplama kalınlığı, trafik dingil yükleri, karışım dizaynı gibi birçok etken yorulma çatlaması üzerinde rol oynarken beton asfalttaki uzun vadede yaşlanmış bağlayıcının rolü de yadsınamayacak boyuttadır. Öngörülen hizmet süresi boyunca asfalt kaplamalı yollarda bu tür bozulmaların önüne geçebilmek için SHRP; 1.59Hz frekansında tatbik edilen DSR deneyinde RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcının yorulma parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) 5000 kPa'dan az olmasını istemektedir. KGM tarafından da benimsenen bu şartın sağlandığı yenilme sıcaklıkları Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Yorulma çatlağı parametresinin en fazla 5000 kPa olduğu sıcaklıklar %8, %10 ve %12 kauçuk içerikli bağlayıcılar için sırasıyla 20.3°C, 20.8°C ve 18.7°C olup bu değerler KTŞ'de KMB 76-16 bitümü için belirlenen yenilme sıcaklığı şartını ( $\leq 34^\circ\text{C}$ ) yerine getirmektedir.



Trafik yüklerine ilaveten olumsuz çevre koşulları asfalt karışımlarda çeşitli bozulmalara yol açabilmektedir. Soğuk havalarda düşük sıcaklıklara maruz kalan asfalt kaplamalar büzülmelemektedir. Büzülme nedeniyle oluşan çekme gerilmesinin büyüklüğü, bitümlü bağlayıcının sertliğine, deformasyona karşı direncine ve kalıcı akma yoluyla enerjiyi dağıtma yeteneğine bağlıdır. Ancak herhangi bir noktada meydana gelen çekme gerilmesi çekme mukavemetini aşarsa, asfalt tabakalardaki çatlak ilerlemesi kaçınılmaz olacaktır. Bu tür çatlaklar, öncelikle tek bir düşük sıcaklık siklusu sırasında meydana gelir, ancak ilerleyen zamanlarda birkaç düşük sıcaklık siklusunda da gelişebilmektedir. Bağlayıcı kıvamının düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamlardaki rolü büyüktür. Düşük sıcaklıklarda sert kıvamlı bağlayıcılar yumuşak kıvamlı bağlayıcılara nazaran daha yüksek çatlama eğilimine sahiptir. Bu nedenle soğuk iklimli bölgelerde hizmet sunacak kaplamalar için hem daha yumuşak hem de sertleşmeye daha az meyilli bir bağlayıcı kullanılması tavsiye edilmektedir. SHRP, bağlayıcının sertliğini ölçmek ve termal çatlama potansiyelini değerlendirmek için Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) testini geliştirmiştir (Bahia&Anderson, 1995b; Roberts vd., 1996; Zaniewski&Pumphrey, 2004). Bu test ile asfalt bağlayıcıların sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değeri) ölçülmektedir. Sünme sertliği; bağlayıcının sabit bir yükü karşı direncinin bir ölçümü, sünme oranı ise yük uygulandıkça bağlayıcı sertliğinin farklılaşmasının bir ölçümüdür (Read&Whiteoak, 2003). Yüksek sünme sertliği asfalt katmanlarının kırılma bir şekilde davranmasına yol açarken yüksek bir sünme oranı bağlayıcının hızlı değişen sertliği nedeniyle enerjiyi dağıtmaya daha yatkın olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 3. RTFOT+PAV ile Yaşlandırılmış Numunelere Ait (a) DSR Yenilme Sıcaklığı; (b) BBR Yenilme Sıcaklığı.

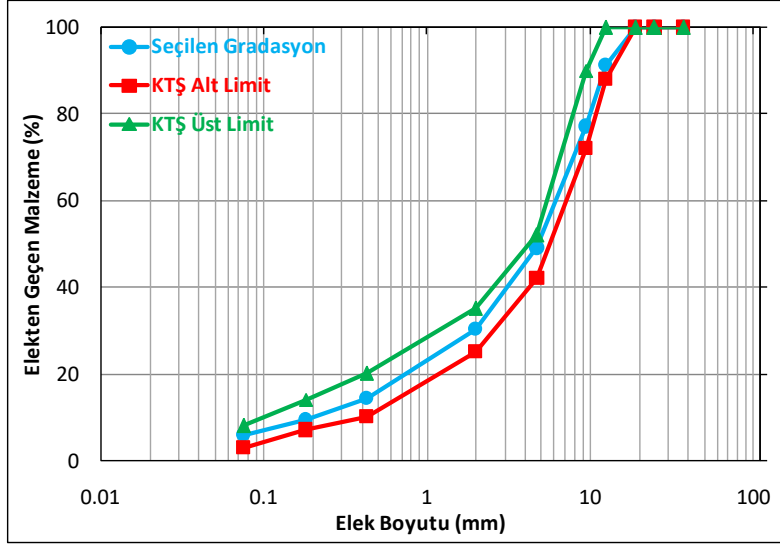
Bu çalışmada kauçukla modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek çatlaklara karşı direncini tayin etmek için BBR testi uygulanmıştır ve rijitlik ile sünme özellikleri ölçülmüştür. RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı ile hazırlanan standart boyuttaki kiriş numunelerine TS EN 14771'de belirtilen şartlarda BBR testi uygulanmıştır. 4 dakika sabit yük uygulanan kirişlere ait zaman-deformasyon ve zaman-sünme sertliği şekilleri çizilmiştir. Bu şekillerde 60 saniye sonunda sünme sertliğinin (S) en fazla 300 MPa olduğu ve sünme oranının (m-değeri) en az 0.300 olduğu yenilme sıcaklıkları tespit edilmiştir. Şekil 3 (b)'den de anlaşılacağı gibi kauçuk içeriğinden bağımsız olarak bu koşulların yerine geldiği sıcaklık her bir bağlayıcı için -12°C olup bu değer KTŞ'de KMB 76-16 bitümü için istenen BBR yenilme sıcaklığı şartını ( $\leq -6^\circ\text{C}$ ) sağlamaktadır. Ayrıca Gawel vd. (2011) kauçuk modifikasyonu ile saf bitümün kırılma noktası sıcaklığının %7-10 oranında düşebileceğini belirtmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada uygulanan geleneksel ve yeni nesil performans deneyi sonuçlarına göre; %8 kauçuk ile modifiye edilen bağlayıcının "Elastik Geri Dönme" değeri ve RTFOT ile yaşlandırdıktan sonra "Yumuşama Noktasındaki Artma" değerinin hedef bitüm olarak seçilen KMB 76-16 kriterlerine uygun olmadığı görülmüştür. %12 kauçuk içerikli asfalt çimentosunun ise RTFOT yaşlandırması sonrasındaki "Yumuşama Noktasındaki Artış" değeri şartname limitleri dışında kalmaktadır. Batman rafinerisinden temin edilen geleneksel saf B50/70 bağlayıcısının %10 kauçuk ile modifiye edilmesi halinde gerek orijinal halde gerek kısa vadede yaşlandırma sonrasında, gerekse kısa+uzun vadede yaşlandırma sonrasında KMB 76-16 için KTŞ'de belirtilen tüm şartları yerine getirdiği tespit edilmiştir. Hem kazandırdığı performans açısından hem de ekonomik olarak nispeten daha az maliyetli olması nedeniyle bu çalışmada %10 oranında kauçuk kullanımı B50/70 bitüm modifikasyonu için uygun görülmüştür. Ayrıca %12 kauçukla yapılacak modifikasyona nazaran %10 modifiyer ajan kullanımı daha az kauçuk tüketimini dolayısıyla homojen bir KMB üretimi için karıştırma sırasında daha az enerji tüketimini ve daha az zararlı gaz emisyonunu, bağlayıcı fazı ile kauçuk arasındaki uyumun artmasını ve depo stabilite probleminin azalmasını sağlayacaktır.

## 5. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı

Marshall dizaynı, Hveem metodu ve Superpave yöntemi, asfalt betonu tasarımı için sıkça kullanılmaktadır. İlk olarak 1939 yılında Mississippi Karayolu Departmanı'nda çalışan Bruce Marshall tarafından bulunan Marshall karışım dizaynı daha sonra Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından birtakım iyileştirmeler yapılarak geliştirilmiştir (White, 1985). Bu deneysel çalışmada da asfalt aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışım tasarımı için TS 3720'de ayrıntılı olarak belirtilen Marshall dizayn yöntemi uygulanmıştır. Tasarımda; Malatya İli, Setrek taşoçağında üretilen bazalt kökenli 16-12 mm ve 12-5 mm dane boyutlu agregalar ile

Malatya İli, Kürecik taşocağında üretilen kalker kökenli 5-0 mm boyutlu agregalar kullanılmıştır. 12-16 mm dane boyutlu agregalardan %17, 12-5 mm dane boyutlu agregalardan %38 olmak üzere toplam %55 oranında bazalt; 5-0 mm boyutundaki agregalardan toplam %45 oranında kalker kullanılmıştır. Şekil 4’de de görüleceği üzere bu çalışmada seçilen kompozit agreganın gradasyon eğrisi KTŞ’de aşınma tabakası için belirtilen minimum ve maksimum gradasyon eğrileri içerisinde kalmaktadır.



Şekil 4. Gradasyon Eğrileri.

Seçilen gradasyona göre kullanılacak kaba ve ince agregalar ile mineral fillere tatbik edilen testler ve sonuçları, %10 kauçuk ile modifiye edilmiş B50/70 penetrasyon dereceli asfalt çimentosunun temel özellikleri ve beton asfaltın efektif özgül ağırlığı aşağıda Tablo 1’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 1. Agregata (Kaba ve İnce), Mineral Filler, Bağlayıcı ve Karışımın Özellikleri.

Özellik	Birim	Sonuç	Deney Metodu
<b>Kaba Agregata</b>			
Los Angeles aşınma kaybı	%	23	TS EN 1097-2
Yassılık indeksi	%	21	BS 812
Magnezyum sülfat don kaybı	%	2.2	TS EN 1367-2
Soyulma mukavemeti	%	75-80	KTŞ Kısım 403 Ek-A
Hacim özgül ağırlığı	-	2.697	TS EN 1097-6
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.815	TS EN 1097-6
Absorpsiyonu	%	1.55	TS EN 1097-6
<b>İnce Agregata</b>			
Hacim özgül ağırlığı	-	2.711	TS EN 1097-6
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.747	TS EN 1097-6
Absorpsiyonu	%	0.49	TS EN 1097-6
<b>Filler</b>			
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.720	TS EN 1097-6
<b>Taze Bağlayıcı (B50/70 Bitüm + %10 Kauçuk)</b>			
Özgül ağırlığı	-	1.04	TS EN 15326
Penetrasyonu (25°C)	d-mm	44	TS EN 1426
Yumuşama noktası	°C	62.3	TS EN 1427
Elastik geri dönme (25°C)	%	61.1	TS EN 13398
Parlama noktası	°C	240+	TS EN ISO 2592
DSR yenilme sıcaklığı	°C	80.6	TS EN 14770
<b>Bitümlü Sıcak Karışım</b>			
Efektif özgül ağırlığı (deneyle)	-	2.744	ASTM D2041
Efektif özgül ağırlığı (hesapla)	-	2.742	ASTM D2041



Bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın seçilen gradasyonda KMB 76-16 ile karışım üretilmesi durumunda kullanılması gereken optimal bitüm miktarını belirlemek için standart Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Beklenen optimum bitüm oranının %0.5 ve %1.0 üstünde ve altında olmak üzere %0.5'lik artışlarla bu çalışmada 6 farklı bağlayıcı oranı (%4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7) test edilmiştir. Her bir bitüm oranı için 3 adet aynı numune (toplam 6x3=18) hazırlanmıştır. Daha önce etüvde ayrı ayrı kaplarda 165°C'de ısıtılmış kompozit agregası, filler ve bağlayıcı homojen bir karışım elde edilecek şekilde bir kapta karıştırılmıştır. Daha sonra ısı kaybı olmayacak şekilde karışım hızlıca standart kalıplara yerleştirilmiştir. Karışım 45.72 cm yükseklikten düşüş yapan 4.536 kg ağırlığındaki otomatik bir kompaktörle her yüzüne 75 darbe vurularak sıkıştırılmıştır. Kod verilen numuneler kalıpla birlikte soğuduktan sonra dikkatli bir şekilde herhangi bir örselenme olmadan kriko ile kalıptan çıkarılmıştır.

Farklı bağlayıcı oranında hazırlanan 10.16 cm çapında ve 6.35 cm yüksekliğindeki standart numunelerin stabilite, akma, agregalar arası boşluk oranı (VMA), bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (VFB), hava boşluk oranı ve hacim özgül ağırlığı belirlenmiş olup her bir parametrenin artan bitüm yüzdesine göre değişim grafikleri çizilmiştir.

Stabilite ve akma değerini ölçmek için hazırlanan numunelere ASTM D1559 standartları doğrultusunda 60°C sıcaklıkta 5.08 cm/dk sabit deformasyon hızı ile yükleme yapılmıştır. Bu yük altındaki numunelerin kırılma anındaki dayanım gücünü gösteren stabilite değerleri Şekil 5 (a)'da gösterilmiştir. Artan bağlayıcı ile stabilitenin düzenli değişmediği, ilk başta arttığı, %6.5 oranında zirve yaptığı ve daha sonra düşüş eğilimine geçtiği görülmektedir. Ancak bu çalışmadaki her bir karışım KTŞ tarafından istenen minimum stabilite şartını (min. 900 kg) sağlayabilmektedir. Tüm numuneler içerisinde %6.5 bağlayıcı karışım her ne kadar laboratuvar ortamında en yüksek dayanım gücüne (1346 kg) sahip olsa da bu durumun karışımın sahadaki gerçek stabilitesini birebir yansıtmayacağı unutulmamalıdır.

Kırılma anındaki düşey deformasyon değerini ifade eden akma; asfalt karışımların dingil yükleri altındaki elastik ve plastik davranışı hususunda önemli bir fikir vermektedir. Bu çalışmadaki numunelerin farklı bağlayıcı yüzdelerindeki akma değerleri Şekil 5 (b)'de gösterilmiştir. Bitüm miktarı arttıkça karışımların akma değerinin dolayısıyla plastik özelliğinin yükseldiği anlaşılmaktadır. Yüksek akma değeri kalıcı şekil değiştirmelerine karşı daha hassas olacak plastik karışımları işaret ederken düşük akma değeri prematüre çatlaklara yol açabilecek düşük hava boşluğunu işaret etmektedir. Bu nedenle KTŞ aşınma tabakası için dizayn edilecek asfalt karışımların en az 2 mm en fazla ise 4 mm akma değerli olmasını şart koşmaktadır. Bu çalışmada %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 oranında bitüm içeren karışımların akma değerleri sırayla 3.07, 3.13, 3.31, 3.42 ve 3.79 mm olup sadece %7 bağlayıcı içerikli karışımlar istenen şartı yerine getirememektedir (4.30 mm).

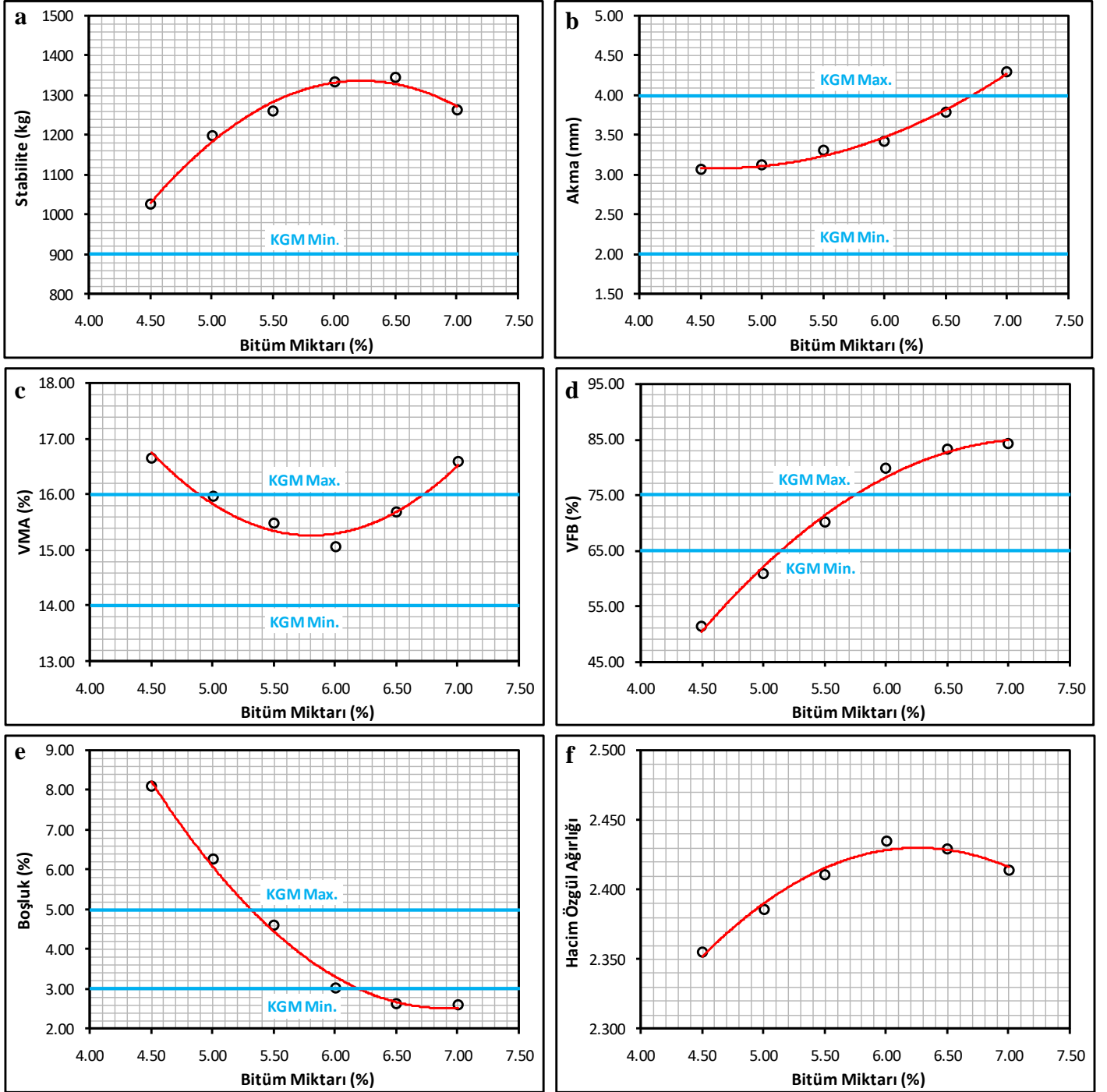
Numunenin toplam hacminin bir yüzdesi olarak da bilinen VMA karışımdaki hava boşluğu ve efektif bitümlü bağlayıcı miktarını ifade etmektedir. Bir başka deyişle VMA sıkıştırılmış bir karışımdaki agregası daneleri arasındaki intergranuler hava boşluğundan ibarettir. VMA değerinin düşük olması; münferit agregası parçalarını istenen düzeyde kaplayabilecek bağlayıcı için karışımda yeterli alanın bulunmadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca düşük VMA'lı karışımlar bitümlü bağlayıcı miktarındaki küçük değişimlere karşı çok hassastır. VMA'nın çok yüksek olması ise karışımın stabilitesinin düşük olmasına yol açacaktır. Bu nedenle tasarım esnasında optimum VMA değerinin sağlanması asfalt karışımda kumaya veya düşük stabiliteye yol açmayacak düzeyde bir bağlayıcı film kalınlığı elde edilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. KTŞ asfalt aşınma tabakası için üretilecek asfalt betonundaki VMA'nın en az %14 en fazla ise %16 olmasını şart koşmaktadır. Bu çalışmada %4.5 ile %7 arasında değişen bağlayıcı oranlarına göre elde edilen VMA değerleri Şekil 5 (c)'de gösterilmiştir. VMA'nın artan bitüm oranıyla ilk başta azaldığı daha sonra ters bir çan eğrisi çizerek arttığı görülmektedir. %4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7 bağlayıcı içeren karışımların VMA'ları sırasıyla %16.65, %15.98, %15.48, %15.07, %15.68 ve %16.59 olup bitüm miktarının en düşük (%4.5) ve en yüksek (%7) olduğu oranlarda KTŞ tarafından belirlenen üst sınır değeri aşılmaktadır.

VMA'nın asfalt çimentosu ile doldurulan hacminin yüzdesi olarak da ifade edilen VFB esnasında efektif bağlayıcı oranının hacimsel karşılığıdır. VFB karışımın boşluk oranı ile ters orantılıdır. Bir başka deyişle hava oranı azaldıkça artan VFB bir nevi hava boşluğunun sigortası niteliğindedir. Bu sayede VFB; düşük boşluklu karışımların ağır trafik yükleri altında oluklanma potansiyelini dolayısıyla kalıcı deformasyon oluşma riskini azaltabilmektedir. Bu çalışmadaki numunelere ait VFB değerleri Şekil 5 (d)'de gösterilmiştir. Bağlayıcı miktarındaki her 0.5%'lik artış VFB değerini eğrisel bir şekilde arttırmıştır. Servis ömrü süresince herhangi bir kalıcı deformasyon ve kuma görülmeden aşınma tabakasının iyi bir performans gösterebilmesi için karışımın VFB değerinin KTŞ'de %65 ile %75 arasında olması istenmektedir. Ancak bu çalışma, bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın sadece %5.5 oranında KMB 76-16 ile kullanılması durumunda bu şartın yerine getirebileceğini göstermiştir.

Sıkıştırılmış bir asfalt kaplamadaki bağlayıcı ile kaplanmış agregası daneleri arasındaki küçük hava paketlerinin toplam hacmi karışımın boşluk oranı olarak ifade edilmektedir. Stabilite, permabilite ve durabilite ile yakından ilişkili olan hava boşluğu miktarı karışımın saha performansı açısından çok önemlidir. Normal boyutlu agregalar ile hazırlanmış bir karışımda hava boşluğunun az olması; yüksek sıcaklıklarda tekrarlayan ağır dingil yükleri altında bitümün kaplama yüzeyine çıkmasına yani terlemesine sebep olabilmektedir. Diğer taraftan yüksek hava boşluğu ise asfalt betonunun suya karşı daha geçirgen olmasına neden olacaktır. Bu nedenle KTŞ'ye göre asfalt aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü karışımdaki hava oranının %3 ile %5 arasında olması gerekmektedir. VFB değerlerine ait grafiğin tersine Şekil 5 (e)'de de görüleceği üzere bu çalışmadaki numunelerin hava boşlukları artan bağlayıcı miktarı ile hemen hemen doğrusal bir şekilde azalmaktadır. KTŞ'deki üst sınır değerin üzerinde hava boşluğu içeren %4.5 ve %5 bağlayıcı karışımlar daha

geçirgen olacağından suya ve havaya karşı daha az dirençli olacaktır. %6.5 ve %7 bitüm oranında ise yeterli bir hava boşluğu elde edilemeyeceğinden sıcak bölgesi iklimlerde kullanılması halinde bu karışımlarda asfalt kusması kuvvetle muhtemel olacaktır.

Karışımların değişen bağlayıcı içeriklerine karşılık gelen hacim özgül ağırlıkları Şekil 5 (f)'de verilmiştir. Artan bitüm oranı ile hacim özgül ağırlığının çan eğrisi şeklinde ilk başta arttığı, %6 oranında pik yaptığı ve daha sonra düşüş eğilimine geçtiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada %4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7 bağlayıcı kullanılması halinde 2.355, 2.386, 2.411, 2.435, 2.429 ve 2.414 hacim özgül ağırlıklı karışımlar elde edilmiş olup KTSŞ'de bu hacimsel parametre için herhangi bir alt ve üst sınır değer belirtilmemiştir.



Şekil 5. (a) Stabilite; (b) Akma; (c) VMA; (d) VFB; (e) Boşluk; (f) Hacim Özgül Ağırlığı.

Elde edilen bu mekanik ve hacimsel parametrelere göre; karışımın %4.5 bağlayıcı içermesi durumunda aşınma tabakası için istenen VMA, VFB ve hava boşluğu şartını, %5 ve %6.5 bağlayıcı oranında VFB ve hava boşluğu şartını, %6 bağlayıcı oranında sadece VFB şartını, %7 bağlayıcı oranında ise akma, VMA, VFB ve hava boşluğu şartını yerine getiremediği anlaşılmıştır.

Marshall metoduna göre yapılan dizayn neticesinde; %55'i bazalt %45'i ise kalkerden oluşan kompozit agreganın asfalt aşınma tabakasında kullanılması halinde agregaya göre ağırlıkça %5.7 oranında (100 gram kuru agrega +5.7 gram bitüm) KMB 76-16 bağlayıcıya ihtiyaç duyulacaktır. Bulunan bu optimum bitüm yüzdesi KTŞ'de belirtilen maksimum ve minimum değerlerin arasında kalmaktadır (%4- %7).

## 6. Sonuçlar

Karayolu üstyapı imalatlarında kullanılan agregaların çok büyük bir kısmı doğal taş ocaklarından temin edilmektedir. Günümüzde taş ocaklarının ruhsatlandırma işleminde yaşanan aksaklıklar ve gecikmeler, çevresel açıdan birçok olumsuz etkilerinin olması, yerleşim yerine yakın yerlerde işletilmesinin istenmemesi ve tek tip agrega temin edebilecek taş ocaklarının rezervinde ve sayısındaki azalmalar ile buna bağlı olarak agrega maliyetinde yaşanan artışlar çözüm noktasında yeni arayışları beraberinde getirmiştir. Hal böyle olunca, bu çalışmada farklı iki ocaktan temin edilen bazalt ve kalker kökenli agreganın kompozit agrega olarak beton asfalt üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bağlayıcı olarak kullanılması hedeflenen KMB 76-16 performans dereceli bitüm; B50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %10 kauçuk ile modifikasyonu sonucu elde edilmiştir. Daha sonra bu bağlayıcı ile %55'i bazalttan %45'i ise kalkerden oluşan kompozit agrega Marshall tasarımı yöntemine göre karıştırılarak aşınma tabakası dizaynı yapılmıştır. Sonuç olarak; %5.7 oranındaki KMB 76-16 bağlayıcısı ve kompozit agregayla üretilen bitümlü sıcak karışımın; KTŞ'de aşınma tabakası için istenen mekanik ve hacimsel şartları sağladığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın, yeterli nitelikteki agregalarla birlikte daha düşük standarttaki agregaların ve/veya geri dönüştürülen atık agregaların sınırlı miktarda asfalt kaplamalarda kullanımını inceleyecek yeni araştırma projelerine ve yeni bilimsel çalışmalara ışık tutabileceği düşünülmektedir. Kompozit agrega içeren bu kaplamaların çeşitli asfalt dizayn yöntemleriyle incelenmesine ilaveten performans testleri yönüyle de (nem hasarı, termal çatlama, yorulma çatlama, oluklanma vb.) değerlendirilmesi yeni araştırmalara konu olabilecektir.

Bölgesel kalkınma programlarına ve kalkınma ajanslarına katkı sağlayabilmek amacıyla bir sonraki çalışmada farklı taş ocaklarından temin edilen farklı tipteki kayaçlardan oluşan kompozit agreganın ılık asfalt üretimindeki kullanılabilirliği araştırılacaktır.

## Referanslar

- Bahia, H. U. & Anderson, D. A. (1995a). The development of the bending beam rheometer; Basics and critical evaluation of the rheometer, *Physical Properties of Asphalt Cement Binders: ASTM STP 1241*, John C. Hardin, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., pp. 28-50.
- Bahia, H. U. & Anderson, D. A. (1995b). Strategic highway research program binder rheological parameters: Background and comparison with conventional properties. *Transportation Research Record 1488*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 32-39
- Cao, W. D., Feng, Z. G., Liu, S. T., & Ren, P. (2013). Experimental research on high temperature creep property of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 43(2), 70-75, DOI: 10.6040/j.issn.1672-3691.0.2012.331.
- Das, A. & Singh, D. (2019). Influence of basalt, hydrated lime, and fly-ash fillers on aging behavior of asphalt mastic using essential and plastic work of fracture. *Journal of Testing and Evaluation* 47, No. 5, 3576-3593, <https://doi.org/10.1520/JTE20180147>.
- Gaweł, I., Piłat, J., Radziszewski, P., Kowalski, K. J., & Król, J. B. (2011). Rubber modified bitumen, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 72-97, <https://doi.org/10.1533/9780857093721.1.72>.
- Huang, S. C. (2008). Rubber concentrations on rheology of aged asphalts binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20:3(221), 221–229. doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(221).
- Iskender, E. (2013). Rutting evaluation of stone mastic asphalt for basalt and basalt–limestone aggregate combinations. *Composites Part B: Engineering*, 54, 255-264, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.019>.
- Kalabińska, M., Piłat, J., & Radziszewski, P. (1999). Rheological properties of Polish binders, no. 085, Eurobitume Workshop, Luxembourg.
- KGM. (2021). Karayolları Genel Müdürlüğü, Yol ağı bilgileri, <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>.

- Kong, D., Xiao, Y., Wu, S., Tang, N., Ling, J., & Wang, F. (2017). Comparative evaluation of designing asphalt treated base mixture with composite aggregate types. *Construction and Building Materials*, 156, 819-827, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.020>.
- Maiah, H. & Al-Khateeb, G. (2012). Effect of basalt and limestone aggregate combinations on Superpave aggregate properties, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Jordanian International Civil Engineering Conference (JICEC)*, Jordan Engineers Association (JEA), Amman, Jordan, January 17-19.
- Piłat, J., Radziszewski, P., & Kalabińska, M. (2000). The analysis of visco-elastic properties of mineral–asphalt mixes with lime and rubber powder, *2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona, Spain, 648–654.
- Radziszewski, P., Piłat, J., & Plewa, A. (2004). Influence of amount of crumb rubber of used car tires and heating time on rubber-asphalt properties, *Proceedings of the 19th International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, PA, S3C.
- Read, J. & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5th ed.). Shell Bitumen, Surrey, UK.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*, second edition, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD.
- Sönmez, İ., Yılmaz, M., & Tuğrul, A. (2009). Farklı agregave üretim prosesleri ile üretilen asfalt karışımlarının özelliklerinin karşılaştırılması, *V. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, pp. 299-308.
- Türkiye Ticaret Bakanlığı. (2021). *Doğal Taşlar Sektör Raporu*, İhracat Genel Müdürlüğü, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, Türkiye.
- USGS. (2018). *Volkan Tehlikeleri Programı*. ABD Jeoloji Araştırması. Erişim tarihi: 8 Şubat 2018.
- Variş, Ç. (2019). *Türkiye Fiziki, Beşeri ve Ekonomik Coğrafyası*.
- White, T. D. (1985). Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. In *association of asphalt paving technologists proc.* (Vol. 54).
- Wikipedia. (2021). Bazalt. Erişim tarihi: 12 Ekim 2021, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Bazalt#cite\\_note-1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Bazalt#cite_note-1).
- Zaniewski, J. P. & Pumphrey, M. E. (2004). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt Technology Program*, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia.
- Zhou, C. H., Liu, S. H., & Yuan, Q. (2014). Experience of replacing basalt aggregate by limestones in porous asphalt concrete. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1025, pp. 749-754). Trans Tech Publications Ltd, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.749.