

PAPER DETAILS

TITLE: Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların İlik Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi

AUTHORS: Derya Kaya, Ali Topal

PAGES: 0-0

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/221109>

Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi

Derya Kaya, Ali Topal*

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, +90 232 3017040

d.kaya@deu.edu.tr

ali.topal@deu.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar/ Corresponding author

Geliş / Recieved: 5 Nisan (April) 2016

Kabul / Accepted: 20 Ağustos (August) 2016

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.15420>

Özet

Karayolu ulaşımı, artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte günden güne daha yoğun kullanılan bir ihtiyaç haline gelmektedir. Bu nedenle, Bitümlü Sıcak Karışıma (BSK) kıyasla daha düşük sıcaklıklarda üretildiği için insan sağlığına daha az zararlı, düşük enerji tüketimi ile çevre dostu Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojisinin gelişmesi gerekliliği doğmuştur. Ayrıca, artan trafik yüklerine bağlı olarak Marshall yöntemi ile üretilen asfalt kaplamalardan istenilen performansın alınamaması ile birlikte yaşanan sürüş emniyeti ve yolculuk konforundaki azalma, farklı tasarım yöntemlerinin de araştırılmasına sebep olmuştur. Bunların ışığında geliştirilen, uygulanacağı bölgenin iklim ve trafik koşullarını dikkate alan Superpave yönteminin ülkemizde yapılan araştırmaları ve uygulamaları oldukça yeni ve yetersizdir. Bu çalışmada, Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri ile IKA üretmek için üç çeşit IKA katkısı (Sasobit, Rediset, Advera) ve bunlara alternatif olabileceği düşünülen doğal zeolit kullanılmıştır. Farklı tasarım yöntemlerine göre elde edilen numunelerin VMA (mineral agregalar arası boşluk oranı), VFA (bitüm ile dolu boşluk oranı) ve boşluk oranları tespit edilerek optimum bitüm oranları belirlenmiş ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, IKA katkıları ile üretilen asfalt numunelerinin optimum bitüm miktarları geleneksel BSK'a oranla her iki tasarım yönteminde de daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, doğal zeolit katkısı hariç diğer tüm IKA katkılar için optimum bitüm oranı Marshall tasarım yönteminde Superpave tasarım yöntemine kıyasla daha düşük çıkmıştır.

Anahtar Sözcükler — Ilık karışım asfalt, Sasobit, Rediset, Advera, Doğal zeolit, Marshall, Superpave.

Investigation of the Warm Mix Asphalt Properties by Using Marshall and Superpave Mix Design Methods

Abstract

Highway transportation is becoming a more common requirement day by day together with the increasing human population and evolving technology. Therefore, Warm Mix Asphalt (WMA) technology which is produced at lower temperatures (low energy consumption), less harmful to human health, and environmentally friendly compared to Hot Mix Asphalt (HMA) has been a necessity. Besides, depends on the increased traffic demand asphalt pavement failures encountered. This reduction in driving safety and ride comfort leads to investigation of a new mix design method. Development in the light of these requirements researches and applications of Superpave method that takes into account the region's climate and traffic conditions is a fairly new and inadequate in our country. In this study, WMA mixes were produced by using Marshall and Superpave mix the design methods with three different type of WMA additives (Sasobit,

Rediset, Advera) and also natural zeolite which may be considered to be an alternative of them. Optimum bitumen content of each asphalt mixtures which produced by two different design methods, were determined according to the VMA, VFA and air voids value and the result were then compared. According to the experimental results, the optimum bitumen content of the WMA mixtures is lower than the optimum bitumen content of the HMA. Additionally, optimum bitumen content of WMA mixtures which are produced by Marshall mix design methods are lower than the Superpave mix design methods for all WMA additives except natural zeolite.

Keywords — Warm mix asphalt, Sasobit, Rediset, Advera, Natural zeolite, Marshall, Superpave.

1 Giriş

Ülkemizde ve dünyada en yaygın ulaşım türü olan karayolu ulaşımı, artan nüfus ve ulaşım talebi ile gün geçtikçe daha geniş kullanım ağına sahip olmaktadır. Karayolları, üretimi aşamasında insan sağlığı ve çevreye olan etkisi, servis süresince ise konfor ve emniyet özellikleri ile çevreyi ve insan hayatını doğrudan etkilemektedir. Karayollarına olan talebin gün geçtikçe artması, asfalt kaplama tasarımında kullanılan ampirik yöntemlerden Marshall yöntemi ile üretilen kaplamalardan beklenen performansın karşılanamaması ve yüksek trafik yüklerinin sebep olduğu kalıcı deformasyonlar, yeni bir tasarım yöntemine olan ihtiyacı gündeme getirmiştir. Özellikle kalıcı deformasyonlar ve düşük sıcaklık çatlakları açısından bölge ve iklim koşullarını dikkate alan Superpave yönteminin ülkemiz koşulları açısından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Superpave ve Marshall tasarım yöntemleri, birbirinden farklı deneylerin uygulandığı ve farklı şartnamelere bağlı tasarım yöntemleridir. Bu sebeple, tasarım sonucunda üretilen asfaltların fiziksel ve mekanik özellikleri de birbirinden farklı olmaktadır. Superpave tasarım yöntemi dünyada gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Superpave yöntemini kullanan ve geçiş yapan ülkelerde, tasarım yöntemlerinin kıyaslanması amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [1].

İnsan sağlığı ve çevreye verilen zararın en aza indirilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda ise, bitümlü sıcak karışımın (BSK) üretiminin ve seriminin yüksek sıcaklıklarda yapılması nedeni ile çevre ve insan sağlığına daha az zarar verdiği bilinen, ayrıca; enerji kullanımı açısından daha ekonomik çözümler sunan Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojisinin temelleri atılmıştır.

İlk kez 1956 yılında Iowa üniversitesi tarafından geliştirilmeye başlatılan IKA teknolojisi ile ilgili araştırmalar ülkemizde başlangıç aşamasındadır [2, 3, 4, 5]. IKA teknolojisinde çeşitli katkılar yardımıyla asfalt viskozitesi düşürülerek işlenebilirliğin artırılması amaçlanmaktadır [6]. Bu sayede, BSK'ya kıyasla daha düşük sıcaklıklarda uygulama kolaylığı, enerji tasarrufu ve çevreyle ilgili faydalar sağlanmaktadır [7]. BSK ile kıyaslandığında çok önemli avantajlara sahip olan IKA teknolojisi, araştırmaların henüz çok yeni olması nedeniyle uygulamada BSK kadar yaygın kullanılmamaktadır. Bu nedenle, Ilık karışım asfaltların tasarım yöntemleri açısından da ele alınması gerekmektedir.

1950'li yıllarda Valerga, çalışmalarında farklı sıkıştırma yöntemlerinin, aynı yoğunluğa sahip olabileceklerini ancak stabilite ve akma değerleri açısından farklılıklara sebep olacağını göstermiştir. Buradan yola çıkarak, sıkıştırma yöntemlerinin parçacıkların yerleşim yapısını değiştirdiği ve böylece deformasyona karşı duyarlılıklarının da değişebileceği sonucu ortaya çıkmıştır [8].

Bir başka çalışmada ise Maupin, Marshall tokmağı ve iki farklı yoğurmalı pres ile sıkıştırılan numuneleri optimum bitüm oranları açısından incelemiştir. Farklı yoğurmalı presler ile Superpave esaslarına göre sıkıştırılan numunelerin birbirleri ile benzer, ancak; Marshall numunelerine kıyasla oldukça farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece, Superpave yönteminin ve aparatlarının arazi koşullarında sıkışmayı temsil etmesi açısından daha kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Habib ve arkadaşları ise, 1998 yılında Superpave yönteminin düşük hacimli yollarda kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlar, elde ettikleri

sonuçları Marshall yöntemi sonuçları ile kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda, Marshall yönteminin avantajlarından bir tanesinin tasarımın yerel koşullara ve malzemelere göre yapılması olarak bulunmuştur. Fakat Superpave yönteminin tekerlek izi, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları gibi parametrelere de dikkat çektiği için evrensel olarak da kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir [10].

Brown tarafından 2000 yılında Colorado Üniversitesinde yapılan farklı bir çalışmada Marshall ve Superpave yöntemleri ile üretilen asfalt numunelerinin optimum bitüm oranları kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda, Superpave yönteminde daha düşük bitüm içeriği saptanmıştır. Ayrıca, hava boşlukları sabit kalırken mineral agregadaki boşluk oranları (VMA) Superpave yönteminde belirli oranda daha düşük çıkmıştır. Gerekli bitüm miktarının daha düşük olması çevresel ve ekonomik faydaları da beraberinde getirdiği için Superpave yönteminin daha tercih edilebilir olduğu ifade edilmiştir [11].

2002 yılında Kanneganti tarafından yapılan çalışmada, Batı Virjinya'daki maksimum nominal agrega boyutu 19 mm olan asfalt karışımların yüksek trafik hacimli yollar için Marshall ve Superpave yöntemleri ile tasarımları araştırılmış ve elde edilen sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Araştırmacı yaptığı çalışmada, literatür bilgilerinden farklı olarak, tüm trafik seviyeleri için Superpave yöntemi ile tasarlanan yolların optimum bitüm miktarının Marshall yöntemine kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur [12].

Watson ve arkadaşları 2005 yılında Alabama'da Marshall ve Superpave yöntemlerinin kıyaslanması konusunda yaptıkları çalışmada, sahadaki ile aynı yoğunluğa eşit numune hazırlamak için kullanılan devir sayısı (N_{des}) değerinin optimum bitüm miktarı tayininde kullanılan yoğurma sayısı olduğunu ve bu değerın iklim ve trafik koşullarına göre değiştiğini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, Marshall ve Superpave yöntemleri ile tasarlanmış 200 asfalt yol projesi içerisinden servis yılı, trafik koşulları, karışım tipi, agrega tipi, bitüm tipi, gradasyon eğrisi ve iklim özellikleri olabildiğince yakın projelerin tasarım yöntemlerine göre bitüm miktarlarını kıyaslanmasına da yer verilmiştir. Sonuç olarak, kullanılan malzemelere göre, Marshall yöntemi ile üretilen asfalt

kaplamaların çoğu daha yüksek optimum bitüm içeriğine sahip olsa da, Superpave yöntemi ile üretilip daha yüksek optimum bitüm miktarına sahip örnekler de mevcuttur [13].

Nelson 2005 yılında yaptığı araştırmada, 9,5 mm nominal maksimum tane çaplı asfalt karışımlarının Marshall ve Superpave yöntemleri ile yoğun ve orta yoğun trafik koşulları altında tasarım şartları ve optimum bitüm miktarlarının kıyaslanmasına yer verilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı tip agrega karışımı kullanılarak Marshall ve Superpave yöntemleri için optimum bitüm oranları belirlenmiş ve kendi içlerinde kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre, kalker içeren numunelerde optimum bitüm oranı Superpave tasarımında Marshall tasarım yöntemine kıyasla daha yüksek sonuçlar verirken, ince agrega içeren numunelerde bu durum tam tersine dönmüştür. Yani, küçük çaplı parçacıklar içeren numuneler yoğurma esaslı Superpave yönteminde boşluk oranını düşürmektedir. Böylelikle, optimum bitüm oranında da azalma yaşanmaktadır [14].

Namlı ve Kuloğlu tarafından 2005 yılında yapılan bir çalışmada ise, Superpave ve Marshall tasarım yöntemleri ile hazırlanan numuneler için; stabilite, birim ağırlık, boşluk yüzdesi, agregalar arası boşluk yüzdesi ve akma değerleri açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunlara ek olarak her iki yöntem içinde gerekli optimum bitüm oranları tespit edilmiştir, Superpave karışım tasarımı yönteminde, bu oranının daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, Superpave tasarım yönteminde agrega gradasyonu, bitüm seçimi ve sıkıştırma tekniklerindeki farklılıklara da değinen araştırmacılar, bu yöntemin Türkiye'de kullanımının gerekliliğini vurgulamışlardır [15].

İlık Karışım asfaltlarda tasarım yöntemi farklılığının incelendiği bir çalışmaya literatür kapsamında rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında, farklı İKA katkıları ile üretilmiş asfalt numuneleri Superpave ve Marshall tasarım yöntemleri ile üretilerek sonuçları birbirleri ile ve BSK karışımları ile optimum bitüm içerikleri açısından kıyaslanmıştır. Böylece, İKA katkılı asfalt numunelerin üretim aşamasında, yoğurmalı ve darbeli yöntemlere göre hava boşluğu, VMA, VFA

özelliklerindeki değişimlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2 Materyal Metot

2.1 Tasarım Yöntemleri

1943 yılında kabul edilen Marshall tasarım yöntemi ile laboratuvar ortamında sıkıştırılan numunelerin yoğunluk değerleri arazideki değerlere oldukça yakın çıkmaktadır. Fakat, tasarımın iklim özellikleri dikkate alınmadan, deneme yanılma yöntemi ve geçmiş uygulamaların istatistiksel sonuçları ile yapılıyor oluşu, bazı durumlarda istenilen performans seviyesine erişimi engellemektedir. Ayrıca; tokmak yardımıyla darbeleri sıkıştırma uygulanması, karayolunun trafik etkisiyle arazideki sıkışma şeklini doğru temsil etmemesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte darbeleri sıkıştırmanın agregaların kırılmasına yol açması araziye daha iyi temsil eden farklı tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır.

Marshall tasarım yöntemindeki eksiklerin ışığında 1987 yılında oluşturulan ve halen geliştirilmekte olan Superpave tasarım yönteminde sıkıştırma işlemi, tekerleğin hareketini daha iyi temsil etmek adına belirli bir açı ve belirli bir basınç ile “yoğurma” yapılmaktadır. Yoğurmalı sıkıştırma, numune içerisinde kayma gerilmesi oluşturmakta ve sıkışma esnasında agrega tanelerinin kırılmasını engellemektedir [16]. Ancak; Superpave tasarım yönteminde kullanılan ekipmanlar diğer yöntemlere kıyasla biraz daha maliyetlidir.

• Marshall Tasarım Yöntemi

Karayolları Mississippi Departmanı mühendisi Bruce Marshall 1939 yılında bu metodu bilim dünyasına kazandırmıştır. 1943’de, Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği, gradasyon ve trafik koşulları fonksiyonlarına dayanarak optimum bitüm miktarı tayininde kullanmak üzere Marshall metodunu kabul etmiştir [17]. Marshall Metodu, istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerini sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır [12].

Marshall yöntemi, eksikliklerine rağmen belki de dünyanın en yaygın olarak kullanılan karışım tasarımı yöntemidir. Bu kadar yaygın kullanılmasının nedeni olarak yöntemin şu avantajları gösterilebilir: [17]

1. Numunenin belirli bir kısmına değil, tamamına gerilme uygulayacak şekilde tasarlanmıştır.
2. Minimum çaba ile hızlı bir şekilde yapılmaya müsaittir.
3. Küçük, hafif ve taşınabilir.
4. Laboratuvarda üretilen numunelerin özellikleri gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

Marshall karışım tasarımı 6 adımdan oluşmaktadır. Bunlar:

- Agregası seçimi
- Bitüm seçimi
- Numunelerin hazırlanması
- Yoğunluk ve hava boşluğu değerlerinin bulunması
- Marshall Stabilometresini kullanarak stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarı tayini

Karışım oluşturmadaki ilk adım farklı boyuttaki agregaların kullanım oranlarının belirlenmesi ve böylece şartname sınırları içerisinde kalan bir gradasyonun kullanılmasıdır [18]. Kabul edilebilir bir gradasyon elde edilemeye kadar, farklı oran ve boyutlardaki agregalar ile çeşitli kontrol gradasyonları oluşturulur ve hesaplamalar yapılır. Karışım gradasyonunun kabul edilebilir olması için, ince ve kaba agrega ile filler yüzdelerinin şartnamede verilen sınırlar içerisinde kalması ve VMA değerlerinin istenilen değerlerde çıkması amacıyla 0,45 üslü gradasyon grafiğine çok yakın olmaması gerekmektedir.

Marshall tasarım yönteminde bitümler penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılır ve penetrasyon sınıfı; kullanılacağı bölgenin iklim özellikleri doğrultusunda değişmektedir.

Marshall tasarım yönteminde numuneler Marshall kompaktörüne yerleştirilerek Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KTŞ) Aşınma Tabakası Tip-1 için belirtilen şekilde, her iki yüzeyine de 75’er darbe vurularak sıkıştırılır [19].

Yoğunluk Ve Hava Boşluğu Değerlerinin Bulunması

Kalıplardan çıkartıldıktan sonra kumpas yardımı ile boyları ve çapları ölçülen numunelerin, kuru ağırlıkları, doymuş yüzey kuru ağırlıkları, hacimleri

tartı yardımı ile bulunur. Bulunan değerlerin Marshall tablosunda kullanılmasıyla, numunelerin yoğunluk ve boşluk oranları hesaplanır.

Sıkıştırılmış Numunelerin Özgül Ağırlığı ve Karışım Yoğunluğu

Sıkıştırılmış numunelerde özgül ağırlık hesaplanması ASTM D2726/D2726M-13'da detaylı olarak anlatılmaktadır. Numunelerin ağırlıkları kullanılarak sıkıştırılmış numunelerin ağırlıkları aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (1)$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

A = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

B = Numunenin kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

C = Sudaki numunenin ağırlığı (g)

Karışımın Maksimum Özgül Ağırlığı

Maksimum özgül ağırlığı ASTM D2041/D2041M-11'a göre bulunmaktadır ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)} \quad (2)$$

Burada:

G_{mm} = Maksimum özgül ağırlık

A = Gevşek karışımın havadaki ağırlığı (g)

B = Su doldurulmuş piknometre ve gevşek karışımın ağırlığı (g)

C = Su dolu piknometrenin ağırlığı (g)

Belirli bir bitüm yüzdesi için G_{mm} değerinin bilinmesi, farklı oranlarda bitüm içeren karışımların maksimum özgül ağırlıklarının da bulunmasını sağlamaktadır. Agregaya yığınının efektif özgül ağırlığı sabittir ve bitüm emme potansiyeli içeriğindeki bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Agregaların efektif özgül ağırlığı, G_{se} şu şekilde hesaplanabilir:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (3)$$

Burada:

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımındaki asfalt yüzdesi

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Herhangi bir bitüm yüzdesi ile hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığı ise şöyle hesaplanır:

293

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (4)$$

Burada:

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımındaki asfalt yüzdesi

P_s = Karışımındaki agregaya yüzdesi

G_{se} = Agregaların efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Hava Boşlukları

Hava boşlukları sıkıştırılmış BSK içerisinde asfaltla kaplanmış agregaya parçaları arasında oluşan küçük hava tanecikleridir ya da hava kabarcıklarıdır. Asfalt kaplamanın durabilite özelliği, içeriğindeki hava boşluğuyla doğrudan ilişkilidir. Yüksek hava boşluğu oranı, servis süresince asfalt kaplamanın içerisine zararlı hava ve suyun girmesine sebep olur. Bunun yanı sıra, çok düşük olan hava boşluğu oranları ise, BSK içerisindeki bitümü sıkıştırarak yüzeye çıkıp "kabarma" yaratmasına sebep olur [20].

Yoğunluk ile hava boşluğu doğrudan ilişkilidir. BSK'larda yoğunluk arttıkça, hava boşluğu oranı azalır [18]. Teknik Şartnamelerde, kaplamaların yoğunluğunun, gerekli hava boşluğunu sağlayacak şekilde seçilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Karışımındaki toplam hava boşluğu oranı (VTM) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (5)$$

Burada:

VTM = Karışımındaki toplam hava boşluğu oranı

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi (VMA)

Mineral agregalar arasındaki boşluk, VMA, sıkıştırılmış karışımın agregalarının tanecikleri

arasındaki boşluk alanı hacmidir. VMA, BSK'nın durabilitesini etkileyen en önemli tasarım parametrelerinden birisi olarak gösterilir [21]. VMA, bitüm ve hava boşluğu ile dolu olan alanların tümünü kapsamaktadır ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VMA = 100 \left[1 - \frac{G_{mb} (1 - P_b)}{G_{sb}} \right] \quad (6)$$

Burada:

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

G_{sb} = Agregalar karışımının özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

P_b = Karışımındaki asfalt yüzdesi

2.1.6 Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi(VFA)

Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi, VFA, sıkıştırılmış karışımındaki agregalar parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluğu temsil etmektedir. Başka bir deyişle, bitümle dolu boşluk yüzdesi olarak da söylenebilir [20]. Karışım içerisindeki VFA ihtiyacının amacı, mineral agregalar arasındaki maksimum boşluğu ve buna bağlı olarak asfalt içeriğini sınırlamaktır. VFA yüzdesi şöyle hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100 \quad (7)$$

Burada:

VFA = Karışımındaki bitüm ile dolu boşluk (%)

VMA=Mineral agregalar arasındaki boşluk (%)

VTM = Toplam karışımın boşluk oranı

Marshall Stabilometresini Kullanarak Stabilite Ve Akma Değerlerinin Bulunması

Stabilite ve akma değerleri, Marshall stabilometresi cihazı kullanılarak bulunmaktadır. Akma değeri, numunenin düşey deformasyon değerine eşittir [22]. Cihazın kaydettiği veriler ekrandan okunur. Ancak, stabilite okuması sadece 63,5mm'lik numuneler için doğru sonuç vermektedir. Bu yüzden, farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörleri geliştirilmiştir. Düzeltilmiş akma ve stabilite değerlerinin şartname sınırları içinde olup olmadıkları kontrol edilir.

Optimum Bitüm Miktarı Tayini (ASTM D2172/D2172M-11)

Optimum bitüm miktarını bulabilmek için öncelikle tüm hacimsel parametrelerin, stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin şartname sınırları içerisinde kalm 294 suretiyle %4 hava boşluğu sağlayan bitüm mikt... optimum bitüm miktarı olarak atanır. Bu sebeple asfalt yüzdesi ve boşluk oranı grafiğinde %4 boşluk sağlayan bitüm yüzdesinin sebep olduğu VMA, VFA, stabilite ve akma değerlerinin şartname sınırları içerisinde olup olmadığı kontrol edilir. Tüm parametreler sınırlar içerisinde kalıyorsa, optimum bitüm miktarı bulunmuş olur. Çizelge 1'de Aşınma Tip-1 gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım yöntemi kriterleri verilmiştir [19].

Çizelge 1. Marshall tasarım yöntemi kriterleri

Tasarım Kriteri	Deney Standartı	Aşınma Tip-1
Sıkıştırma, her bir yüzey için darbe sayısı	TS EN 12697-30	75
Stabilite (kg)	TS EN 12697-34	900
Boşluk (%)	TS EN 12697-8	3-5
VFA (%)	TS EN 12697-8	65-75
VMA (%)	TS EN 12697-8	14-16
Akma (mm)	TS EN 12697-34	2-4

• Superpave Tasarım Yöntemi

Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) olarak isimlendirilen "Yüksek performanslı kaplama" yöntemi, A.B.D.'deki "Strategic Highway Research Program" (SHRP) "Stratejik Yol Araştırmaları Programı" tarafından 1987 yılında geliştirilmeye başlanmıştır [23]. Sadece %4 hava boşluğu kriterine sahip bu yöntemde numunelerin sıkıştırılması için yoğurmalı pres cihazı kullanılmaktadır.

Superpave yöntemi, A.B.D.'de yüksek sıcaklıklar ve ağır taşıt yükleri için Marshall yönteminin geliştirilmesi ile oluşturulan karışım tasarım yöntemidir [14]. Ayrıca, Marshall tasarım yönteminden farklı olarak agregalar ve bitüm seçiminde uygulanacak bölgenin trafik yükü ve sıcaklık değerlerine de bakılır [16].

Superpave Karışım Yöntemi 7 adımdan oluşmaktadır. Bunlar:

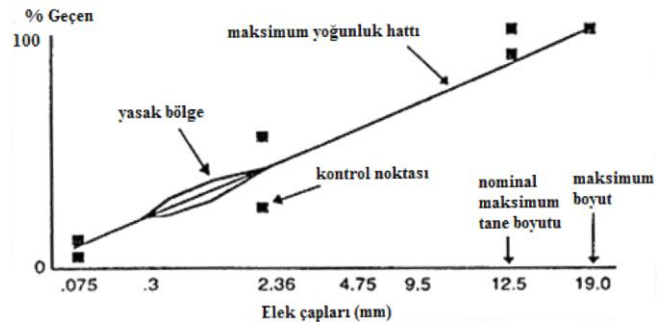
- Agrega seçimi
- Bitüm seçimi
- Numunelerin hazırlanması (sıkıştırma işlemini de kapsamaktadır.)
- Performans testleri
- Yoğunluk ve hava boşluğu değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarı tayini
- Nem hassasiyeti değerlendirmesi

Superpave tasarım yöntemini Marshall yöntemi arasındaki en belirgin farklılıklardan biriside agrega seçimidir. SHRP'nin oluşturduğu Superpave karışım yönteminde asfalt kaplamanın performans özellikleri için son derece önemli olan agrega özelliklerinden detaylıca bahsedilmemesi sebebiyle, uzman bir grup bir araya gelip “mutabakat özellikleri” ile istenilen çeşitli agrega özelliklerini tartışmışlardır [24].

Bunlar:

- Kaba agrega köşeliliği (ASTM D5821-13)
- İnce agrega köşeliliği (ASTM C1252-06)
- Uzun ve yassı parçacıklar (ASTM D4791-10)
- Kil içeriği, Kum eşdeğerlik testi (ASTM D2419-09)

Superpaveve Marshall Tasarım yöntemlerinin her ikisinde de “yoğun gradasyon” kullanılmaktadır. Ancak; Superpave karışım tasarımı yönteminde, agrega gradasyon sınırlarını oluşturan kontrol noktaları ve çeşitli özellikteki agrega oranları olmak üzere iki önemli nokta vardır. Bu tasarım yönteminde dikkat çeken bir başka nokta ise, 0,45 üslü gradasyon grafiği ile agrega seçiminde dikkat edilmesi gereken kontrol noktaları ve yasak bölgesidir. Gradasyonun kontrol noktaları arasından geçmesi fakat yasaklanmış bölgeden geçmemesi gerekmektedir [16]. Kontrol noktaları, en küçük (0,075mm), 2,36 mm, nominal maksimum (12,5 mm) ve maksimum (19 mm) tane boyutlarına denk gelen noktalardır. Yasak bölge ise, Superpave karışımlarında fazla kum miktarını dengelemek, bu sebeple ortaya çıkan sıkıştırma problemleri ve yolun servis ömrü boyunca oluşacak deformasyonları minimuma indirmek açısından gradasyon eğrisini maksimum yoğunluk hattından uzaklaştırmak amacıyla yaratılmıştır [25]. Şekil 1’de Superpave yönteminin gradasyon limitleri, kontrol noktaları ve yasak bölge gösterilmiştir.



Şekil 1. Superpave gradasyon limitleri

Superpave tasarım yönteminin performans derecelendirme (PG) sistemi olarak adlandırılan kendine has bitüm sınıflandırma sistemi vardır. Bu sisteme göre, bitüm, kaplamanın minimum ve maksimum derecelerine göre sınıflandırılır [23]. Kaplama sıcaklığının yanı sıra, trafik hacmi ve trafik hızı da bitüm derecesini değiştirmektedir. Düşük trafik hacmi ve hızı bitüm sınıfı seçimin de önem arz etmektedir [26].

Superpave yoğurmalı pres cihazı, karışımın gerçek sahadaki parçacık hareketlerini laboratuvar koşullarında temsil etmek amacıyla geliştirilmiştir [22].

Superpave yoğurmalı pres, karışım numunelerini gerçek kaplama sıcaklığı ve yükleme koşullarındaki yoğunluklarda gerçeğe yakın olarak sıkıştırmaktadır. Yoğurma sayısı (jirasyonu), sıkışma sonrası numune yüksekliği ve basıncı önceden saptanabilmektedir. Yükleme mekanizması numunede 600 kPa sıkıştırma basıncı üretecek bir yükü, yükleme kafasına uygular. Asfalt numuneleri 100 mm ya da 150 mm çapında kalıplar kullanılarak standarttaki yoğurma açısı altında sıkıştırma süresince dakikada 30 sabit dönüş olacak şekilde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Şekil 2’de yoğurmalı pres cihazı ve sıkıştırma başlığı görülmektedir.



Şekil 2. Yoğurmalı pres cihazı ve sıkıştırma başlığı

Çizelge 2 ve 3’de de gösterildiği gibi Superpave karışım tasarımı yönteminin, yolun trafik hacmine göre üç farklı devir sayısı vardır:

Çizelge 2. Superpave karışımları için karayolu sınıflandırmaları

Dizayn Eşdeğer Tek Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı (ESAL) (milyon)	Tipik Karayolu Uygulamaları
< 0,3	Düşük trafik seviyeli yerel yollar, ilçe yolları ya da ağır araç trafiğine maruz kalmayan şehir yolları
0,3 - 3	Toplayıcı yollar ve ulaşım sokakları, orta seviyeli şehir yolları ve önemli ilçe yolları
3 - 30	Çift şeritli, çok şeritli, bölünmüş ve kısmen ya da tamamı ile kontrollü ulaşım karayolları, yüksek trafik seviyesine sahip şehir yolları
> 30	Ağır kamyon trafiğine maruz kalan, ağır araç tartma istasyonları ya da tırmanma şeridi bulunduran çift şeritli yollar gibi özel uygulamalar bulunan yollar

Çizelge 3. Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri

ESAL (milyon)	Sıkıştırma Parametreleri		
	N _{ilk}	N _{des}	N _{max}
< 0,3	6	50	75
0,3 - 3	7	75	115
3 - 30	8	100	160
> 30	9	125	205

N_{ilk} = Kaplamanın yapımı aşamasındaki sıkışmasını temsil eden devir sayısıdır. Çok hızlı sıkıştırılan numuneler yapım aşamasında çok hassas trafik yüküne maruz kaldıklarında ise çok kararsız olabilir. Trafik yükü 3 milyon ESALs’a eşit ya da büyük olan ve N_{des}’da yüzde 4 boşluk içeren numunelerin N_{ilk}’deki boşluk oranı en az yüzde %11 G_{mm} değeri en fazla %89 olmalıdır. Daha yüksek boşluk oranları karışımın hızlı sıkışmasına sebep olmaktadır [16].

N_{des}=Belirtilen trafik yükü altında, sahadaki ile aynı yoğunluğa eşit numune hazırlamak için kullanılan devir sayısıdır. Sıkıştırılmış ve başlangıç trafik yüklemesi yapılmış kaplamanın özelliklerini temsil eder. N_{des} değerinde sıkıştırılan numuneden % 4 hava boşluğu değeri beklenir [27].

N_{max}= Bu devir sayısı sahada hiçbir zaman ulaşılamayacak laboratuvar yoğunluğunu elde etmek için kullanılmaktadır. Eğer N_{max}’daki boşluk oranı çok düşükse, kaplama trafik yükü altında çok fazla sıkışıp

aşırı düşük hava boşluğu ve tekerlek izine sebep olabilir. N_{max}’daki hava boşluğu kaplamanın servis ömrünün sonundaki boşluktur ve hiçbir zaman %2’nin altına düşmemelidir (G_{mm} değeri en fazla %98 olmalıdır).

N_{max} ve N_{ilk} değerleri N_{des}’in birer fonksiyonudur ve şu şekilde hesaplanırlar:

$$N_{ilk} = (N_{des})^{0.45} \quad (8)$$

$$N_{max} = (N_{des})^{1.10} \quad (9)$$

Burada:

N_{ilk}= Başlangıç devir sayısı

N_{des}= Tasarım devir sayısı

N_{max}= Maksimum devir sayısıdır.

N_{ilk}’e kadar sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı şu şekilde hesaplanır:

$$G_{mb}, N_{ilk} = \frac{h_d}{h_i} (G_{mb}, N_{des}) \quad (10)$$

Burada:

G_{mb}, N_{ilk}= N_{ilk}’e kadar sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

h_d= N_{des}’ye kadar sıkıştırılmış numunenin yüksekliği

h_i= N_{ilk}’e kadar sıkıştırılmış numunenin yüksekliği

G_{mb}, N_{des}= N_{des}’ye kadar sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

N_{ilk}’e kadar sıkıştırılmış numunenin maksimum özgül ağırlığı yüzdesi ise şu şekilde hesaplanır:

$$\%G_{mm}, N_{ilk} = 100 \frac{G_{mb}, N_{ilk}}{G_{mm}} \quad (11)$$

P_b tahmin edilerek kullanılan bir değer olduğu için,VTM %4 hava boşluğu kriterine uygun çıkmayabilir. Bu sebeple, hacimsel özellikler %4 hava boşluğuna göre aşağıdaki denklemler kullanılarak düzeltilir.

$$P_{b,est} = P_{br} - (0,4 \times (4 - V_a @ N_{des})) \quad (12)$$

$$VMA_{est} = VMA @ N_{des} + C \times (4 - V_a @ N_{des}) \quad (13)$$

$$VFA_{est} = \frac{100(VMA_{est} - V_a @ N_{des})}{VMA_{est}} \quad (14)$$

$$Est \% G_{mm,ilk} = \% G_{mm,ilk} - (4,0 - V_a @ N_{des}) \quad (15)$$

$$Est \% G_{mm,m} = \% G_{mm,m} - (4,0 - V_a @ N_{des}) \quad (16)$$

Burada:

P_{b,est}= Tahmin edilen bitüm içeriği

P_{bt}= Bitüm içeriğinin deneme yüzdesi

V_a= N_{des}’daki toplam karışımındaki hava boşluğu yüzdesi

VMA_{est} = Mineral agrega içerisindeki tahmin edilen boşluk yüzdesi

$C = 0,1$ (V_a %4'den küçük olduğu zamanlarda)

$C = 0,2$ (V_a %4 ve %4'den büyük olduğu zamanlarda)

VFA_{est} = Bitüm ile dolu tahmin edilen boşluk yüzdesi

$Est\%G_{mm, ilk} = N_{ilk}$ 'deki tahmin edilen maksimum özgül ağırlık yüzdesi

$Est\%G_{mm, m} = N_{des}$ 'deki tahmin edilen maksimum özgül ağırlık yüzdesi

Superpave karışım yönteminde tasarım için kullanılan yukarıda bahsedilen parametrelerin belirli kriterlerivardır. Çizelge 4'de bahsedilen şartname sınırları yer almaktadır.

Çizelge 4. Superpave Karışım Tasarımı Kriterleri

Tasarım Hava boşluğu	%4				
Filler/ bitüm oranı	0,6-1,2*				
Çekme gerilmesi dayanımı	Min. %80				
Mineral agrega içerisindeki boşluk % (VMA)	Nominal maksimum agrega boyutu				
	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm
	11	12	13	14	15
Tasarım ESAL seviyesi	Maksimum teorik özgül ağırlık %'si			Bitüm ile dolu boşluk %'si (VFA)	
	N_{ilk}	N_{des}	N_{max}		
< 0,3	≤91,5	50	≤98	70-80	
0,3 - 3	≤90,5	75	≤98	65-78	
3 - 30	≤89,0	100	≤98	65-75	
> 30	≤89,0	125	≤98	65-75	

* KTŞ'de bu kriter max. 1,5 olarak yer almaktadır [19]

Her bir bitüm içeriği için hazırlanan numuneler, hava boşluğu ve diğer Superpave kriterlerinin kıyaslanmasıyla optimum bitüm miktarı tayininde kullanılır. Numunelerin hacimsel özellikleri Marshall yönteminde olduğu gibi geliştirilerek grafikleri çizilir. Tasarım yağurma sayısındaki %4 hava boşluğuna denk gelen bitüm miktarı diğer Superpave sınır koşullarının da sağlanması şartıyla optimum bitüm miktarı olarak kabul edilir.

2.2 Malzemeler

Deneyisel çalışmalarda TÜPRAŞ Aliğa rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bitüm üzerine; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık, parlama noktası vb. geleneksel bitüm deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, bağlayıcıların işlenebilirliğinin tespitinde kullanılan ve Superpave sisteminde yer alan Brookfield Dönel Viskozimetresi (RV) ile viskozite

deneyi uygulanmıştır. Deneyisel çalışmaların sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Saf bitüm için laboratuvar test sonuçları

Deney	ASTM Standartı TS EN Standartı	Sonuçlar	ASTM Limiti TS EN Limiti
Penetrasyon Deneyi (25°C; 0,1mm)	ASTM D5/D5M-13 TS EN 1426	55	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36/D36M-12 TS EN 1427	49	46-54
Viskozite (135°C)	ASTM D4402/D4402M-13	412,5	-
TFOT (165°C; 5sa.)	ASTM D1754/D1754M-09 TS EN 12607-2	-	-
Kütle Değişimi(%)	-	0,04	0,5 (maks.)
Penetrasyon Farkı (%)	ASTM D5/D5M-13 TS EN 1426	25	-
TFOT sonrası Yum. Nok. (°C)	ASTM D36/D36M-12 TS EN 1427	54	48 (min)
Duktilite (25°C; cm)	ASTM D113-07 TS EN 13589	100	-
Özgül Ağırlık	ASTM D70-09e1 TS EN 15326	1,03	-
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92-12b TS 123 EN 22592	260	230 (min)

IKA katkıları kullanılarak hazırlanacak olan karışımlarda kullanılmak üzere agrega malzemesi kabası bazalt, incesi kalker olup, bazalt agregası Dere Beton ve Hazır Yaş Sıva Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne ait Aliğa taşocağından kalker agregası ise aynı firmanın Belkahve/İzmir taşocağından temin edilmiştir. Agreganın özelliklerini belirlemek amacıyla agrega grupları üzerinde uygulanan deneyler ve sonuçları, şartname limitleri ile birlikte Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Deneylerde kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Test	ASTM Standartı TS EN Standartı	Sonuçlar		ASTM ve TS EN Limiti
		Kalker	Bazalt	
Kaba Agrega Özgül Ağırlığı	ASTM C127-12			
Hacim		2,686	2,666	-
Kuru Yüzey Doygun		2,701	2,810	-
Zahiri		2,727	2,706	-
İnce Agrega	ASTM C128-12			

Özgül Ağırlığı				
Hacim		2,687	2,652	-
Kuru Yüzey Doygun		2,703	2,770	-
Zahiri		2,732	2,688	-
Filler Özgül Ağırlığı		2,725	2,731	-
Los Angeles Aşınması(%)	ASTM C131-06 TS EN 1097-2	24,4	14,2	maks. 45 maks. 27
Yassılık İndeksi (%)	ASTM D4791-10 TS EN 933-3	7,5	5,5	maks 10 maks. 25
Sağlamlık Yüzdesi (%)	ASTM C88-13			maks. 10-20
İnce Agregat Köşelliliği	ASTM C1252-06	47,85	58,1	min. 40

Çalışma kapsamında kullanılan agregalara ait elek çaplarına göre seçilen gradasyon değerleri ile şartname limitleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Bazalt – Kalker Agregalarının Birlikte Kullanılacağı Karışımlar İçin Seçilen Gradasyon ve Şartname Limitleri

Test	19 – 12,5 mm Bazalt	12,5 – 5 mm Bazalt	5 – 0 mm Kalker	Karışım Grad. (%)	Şartname Limitleri
Karışım (%)	15	45	40		
Elek No:					
(3/4) "	100	100	100	100	100
(1/2) "	35,7	100	100	90,5	83-100
(3/8) "	2,5	89	100	80,5	70-90
No.4	0,4	16	100	47,3	40-55
No.10	0,3	1,2	81	33	25-38
No.40	0,2	0,7	33	13,5	10-20
No.80	0,15	0,4	22	9	6-15
No.200	0,10	0,2	13	5,3	4-10

Çalışma kapsamında, IKA üretmek için üç çeşit IKA katkısı ve bunlara alternatif olabileceği düşünülen doğal zeolit kullanılmıştır. Kullanılan her bir katkının kendine has özellikleri bulunmaktadır. Bunlardan, Sasobit® organik, Rediset® WMX ise kimyasal IKA katkılarındandır. Ayrıca, köpüklendirme teknikleri içerisinde yer alan Advera® katkısı (yapay zeolit) ve doğal zeolit ılık karışım asfalt üretmek amacı ile kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında; organik IKA katkısı olarak Sasobit® kullanılmıştır. Fischer-Tropsch yöntemi ile kömürün karbonizasyonu sırasında elde edilen organik IKA katkısı içerisinde 40 ila 115’den daha fazla karbon atomu bulunduğu için uzun-zincir alifatik hidrokarbon olarak tanımlanır. Kullanılan ılık karışım asfalt katkısındaki bu özellik erime noktasının

FT mumlarına göre daha düşük olmasına neden olmuştur. Üretici firma Sasol Wax’a göre erime noktası 98°C olan organik IKA katkısı, 115°C sıcaklıktaki bitümün içerisinde tamamen çözünmektedir [28]. Ayrıca, karışıma eklendiği zaman homojen bir dağılım elde edilmediği gerekçesiyle bitüme eklenerek kullanılmaktadır [29]. Bitüm içine karıştırıldığında eriyen organik IKA katkısı, bitümün viskozitesini düşürüp, daha akıcı olmasını sağlar [30]. Erime noktasının altındaki sıcaklıklarda kafes bir yapı oluşturan FT mum kristalize olur böylelikle karışımın stabilitesini artırır. Yapılan çalışmalarda organik IKA katkısının yol trafiğe açıldıktan sonra kaplamada meydana gelen tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı saptanmış, sıkıştırmayı kolaylaştırdığı tespit edilmiştir [31]. Üretici firmanın önerileri doğrultusunda organik IKA katkısı karışımın %3’ü oranında kullanılmıştır.

Kimyasal IKA katkı maddesi olan Rediset® AkzoNobel firması tarafından üretilmiştir. Kimyasal IKA katkısı bitüme ya da karışıma eklenebilme olanağına sahiptir ve optimum karışım oranı üretici firma tarafından %2 olarak belirlenmiştir. Bu oranda bitüme eklenen katkı bitümün penetrasyon sınıfını değiştirmemektedir [28]. Katkının yüzey aktif madde oluşu bitümün “aktif adezyon” ile agrega yüzeyini kaplama yeteneğini artmasını sağlarken, diğer özellikleri bitümün vizkozite değerini düşürmektedir [32, 33]. Kimyasal IKA katkısı kullanılan diğer IKA katkıları gibi kohezyonu artırıp tekerlek izi oluşumunu azaltırken, soyulmaya karşı direnci arttırması özelliği ile kaplamanın servis ömrünü belirleyen neme karşı hassasiyette olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlar [2].

Advera® içeriğinde yaklaşık %20 oranında su içeriği bulunduran ve PQ Corporation tarafından Amerika Birleşik Devletleri’nde üretilen bir yapay zeolittir. IKA katkısı olarak kullanıldığı bitümün viskozite değerini düşürerek kullanılabilecek RAP içeriğini arttıran bu katkı aynı zamanda 98°C üzerindeki sıcaklıklarda bitümde köpüklenmeyi sağlayan bünyesindeki su içeriği sayesinde karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır [28]. Tavsiye edilen yapay zeolit katkısı kullanım oranı karışımın toplam ağırlığının %0,25’i kadardır.

Atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip olan kristal yapıdaki alümino-silikat bileşiği doğal zeolitte de tıpkı yapay zeolit gibi içeriğinde su bulundurmaktadır [34]. Deneyisel çalışma sonuçları, yaklaşık %20 oranında su içeriği bulunduran doğal zeolitin suyun kaynama noktası seviyelerinde içeriğindeki suyu bırakarak bitümde köpüklenme sağladığını ve böylelikle IKA teknolojisine katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Organik ve kimyasal IKA katkıları bitümün üretim süre ve sıcaklıkları Çizelge 8’de verilmiştir [35].

Çizelge 8. Üretim sıcaklık ve süreleri [35]

Katkı	Üretim Sıcaklığı (°C)	Üretim Süresi (dk.)
Organik	120	10
Kimyasal	150	15
Yapay Zeolit	120	20
Doğal Zeolit	120	20

IKA katkılı bitümler üretildikten sonra karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, farklı sıcaklık ve üretim sürelerinde katkılı bitümler üzerinde 135°C ve 165°C sıcaklıklarda Brookfield viskozite deneyleri uygulanmıştır. ASTM D4402/D4402-13’e göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tayininde kullanılan viskozite değerleri sırasıyla 170±20 mPa.s ve 280±30 mPa.s’dır.

Saf bitüm ile organik ve kimyasal IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 9’da gösterilmiştir.

Çizelge 9. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

IKA Katkıları	Katkı İçeriği (%)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
Saf Bitüm		156-162	143-148
Organik	3	144-149	133-138
Kimyasal	2	148-153	137-142
Yapay Zeolit	5	147-153	136-141
Doğal Zeolit	5	148-154	137-142

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Bitüm Deneyleri Sonuçları

Deneylerde kullanılan bitüm üzerinde Penetrasyon ve Yumuşama Noktası deneyleri uygulanmış ve elde edilen veriler Çizelge 10’da sunulmuştur.

Çizelge 10. Geleneksel Bitüm Deneyleri sonuçları

IKA katkısı	Oran (%)	Pen. 0.1 mm	Yum. Noktası (°C)	RTFOT sonrası kalıcı pen. (%)	Pen. Index (PI)
Doğal Zeolit	0	55	49,1	26	-1,20
	5	51	55,0	17	0,02
Yapay Zeolit	0	55	49,1	26	-1,20
	5	52	56,0	21	0,27
Organik	0	55	49,1	26	-1,20
	3	37	69,3	15	1,95
Kimyasal	0	55	49,1	26	-1,20
	2	44	56,7	17	0,04

Geleneksel bitüm deneyleri sonuçları incelendiğinde, IKA katkıları kullanımının bitümün penetrasyon değerini düşürdüğü görülmektedir. Ancak; köpükendirme sağlayan katkıların (yapay ve doğal zeolit) kullanıldığı bitümün penetrasyon değerlerindeki azalma diğer katkıların (organik ve kimyasal) kullanıldığı bitümlerdeki azalmaya oranla daha düşüktür. Ayrıca, katkı içeriği arttıkça Penetrasyon İndeksinde düşüş gözlenmektedir.

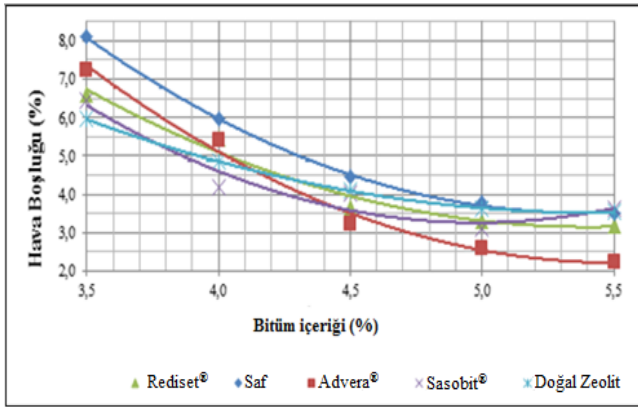
Çalışma kapsamında RTFOT uygulanan organik, kimyasal, yapay ve doğal zeolit katkılı bitümde Penetrasyon İndeksi (PI) değerlerindeki değişime bakılmıştır. Yüksek PI değeri, sıcaklık duyarlılığını azaltır ve düşük sıcaklık çatlaklarına ve kalıcı deformasyonlara karşı direnci arttırmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, organik katkılı bitümün en yüksek PI değerini sağladığı görülmüştür. Bu özellik, iklim sıcaklığının geniş aralıklı olduğu bölgelerde organik IKA katkısının kullanımına olanak sağlamaktadır [3].

Yumuşama noktasındaki artış, kalıcı deformasyonlara (tekerlek izi) duyarlılığı azalttığı için aranan bir özelliktir. IKA katkıları kullanımının bitümün yumuşama noktası değerlerini arttırdığını göstermektedir. Özellikle; organik IKA katkısı kullanılarak hazırlanmış bitümün yumuşama noktasındaki artış daha belirgindir.

3.2 Karışım Deneyleri Sonuçları

Çalışmada Saf ve IKA katkıli bitümler kullanılarak Marshall ve Superpave tasarım yöntemlerine göre sıkıştırılmış numunelerin optimum bitüm miktarları bulunmuş ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Marshall Karışım Dizaynına göre hazırlanan numunelerde boşluk oranlarının tespit edilmesinin ardından, Marshall stabilite ve akma test cihazı kullanılarak IKA katkıli ve saf karışımların akma ve stabilite değerleri ölçülmüştür. Marshall Tasarım Yöntemi standardına göre akma, stabilite, VMA ve VFA açısından şartname sınırları arasında kaldığı kontrolü yapılan ve %4 hava boşluğu sağlayan bitüm oranı optimum bitüm oranı olarak tespit edilmiştir. Böylece, Şekil 3'deki eğriler yardımı ile optimum bitüm miktarları; saf, organik, kimyasal, yapay ve doğal zeolit katkıli karışımlar için sırasıyla, %4,76, %4,25, %4,46, %4,32 ve %4,56 olarak bulunmuştur.



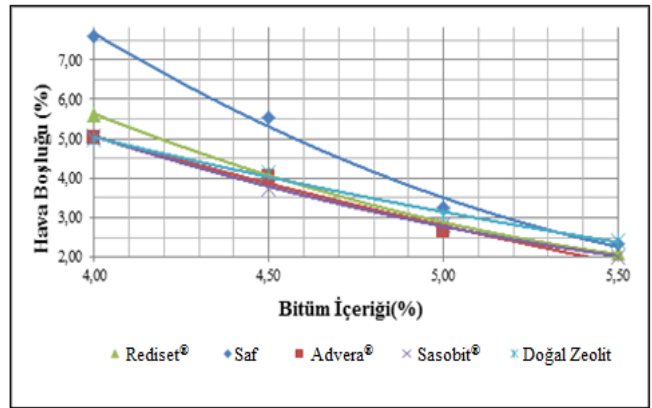
Şekil 3. Marshall yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri

Sonuçlara göre, tüm IKA karışımları için istenilen boşluğu elde etmek amacıyla gereken bitüm miktarı BSK'ya kıyasla daha düşüktür. Böylece, IKA teknolojisi kullanıldığında sıkıştırma işleminin daha kolay gerçekleşeceğini söylemek mümkündür.

Superpave tasarım yöntemine göre yoğurmalı pres kullanılarak sıkıştırılan farklı bitüm oranlarındaki saf ve IKA katkıli numuneler için, %4 hava boşluğu kriteri dikkate alınarak optimum bitüm miktarı tayini yapılır. N_{max} değerine kadar sıkıştırılan numunelerin boşluk oranlarının tespit edilmesinin ardından, yoğurmalı presin sıkıştırma esnasında kaydettiği veriler sayesinde N_{des} değerindeki boşluk miktarına geçiş yapılabilir. Böylece, N_{des} değerindeki saf

ve IKA katkıli asfalt numunelerinin %4 hava boşluğu sağlayan bitüm miktarı, optimum bitüm miktarı olarak belirlenir. Buna göre; saf, organik, kimyasal, yapay ve doğal zeolit katkıli karışımlar için sırasıyla optimum bitüm miktarları, %4,83, %4,4, %4,51, %4,42 ve %4,5 olarak bulunmuştur. Şekil 4'de hazırlanan numunelerin boşluk oranlarının bitüm yüzdesi ile değişimini gösteren grafik verilmiştir.

Superpave tasarım yönteminde de Marshall tasarım yöntemine benzer olarak tüm IKA teknolojisi ile üretilen numunelerin optimum bitüm miktarları BSK'ya oranla daha düşük çıkmıştır. Aynı şekilde, belirlenen en düşük optimum bitüm miktarı organik IKA katkısına aittir.



Şekil 4. Superpave yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri

Marshall ve Superpave tasarım yöntemleriyle üretilen numunelerin katkı türlerine göre optimum bitüm miktarları birbirleri ile kıyaslandığında, doğal zeolit hariç tüm katkıların Marshall tasarım yönteminde Kanneganti'nin bulduğu sonuçlara benzer olarak daha düşük optimum bitüm miktarına sahip olduğu görülmektedir [12]. Nelson'ın 2005 yılında doğal kum kullanarak Superpave ve Marshall tasarım yöntemlerini kıyasladığı çalışma da göz önüne alındığında, doğal zeolit katkıli karışım içerisinde filler etkisi yarattığı ve Superpave tasarım yöntemi için yuvarlak parçacık yapısındaki agregaların gerekli bitüm miktarını Marshall tasarım yöntemine kıyasla düşürdüğü sonucu çıkarılabilir [14]. Yoğurmalı sıkıştırmalarda, küçük parçacıkların (filler, doğal zeolit) darbeli sıkıştırmaya kıyasla boşlukları daha iyi doldurduğu ve bu sayede de gerekli bitüm miktarını düşürdüğünü söylemek mümkündür.

Kontrol numunesinin yanısıra, organik, kimyasal ve yapay zeolit katkıları ile üretilmiş numunelerde de optimum bitüm miktarının Superpave yöntemi için daha yüksek çıkması, kesin bir şey söylemek için yeterli sayılmasa da, Türkiye’de Superpave tasarım yönteminin kullanılmasının daha maliyetli olabileceği sorununu da beraberinde getirmektedir. Neredeyse tüm karayolu ağında Marshall tasarım yönteminin kullanıldığı ülkemizde Superpave tasarım yöntemi kullanımının yaygınlaşması için bölge ve iklim faktörüne göre PG sınıfının, Superpave agrega kriterlerine göre agrega kısıtlarının yeniden belirlenmesi gibi çalışmaların yapılması ve bunların sonucunda gerekli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir.

4 Sonuçlar

IKA teknolojisi ile üretilen asfalt kaplamalar bitümlü sıcak karışımlara oranla daha düşük sıcaklıklarda üretildiği için işlenebilirliği yüksek, çevre ve insan sağlığı dostu, ekonomik ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu bölümde, organik, kimyasal, yapay zeolit ve adı geçen katkılara alternatif olabileceği düşünülen doğal zeolit kullanılarak Marshall ve Superpave tasarım yöntemlerine göre üretilen ılık karışım asfalt numunelerine uygulanan deneylerin sonuçları irdelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri kullanılarak üretilen IKA numuneleri için gerekli optimum bitüm oranının saf bitümle hazırlanmış numunelerin optimum bitüm oranına kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Buna sebep olarak, IKA katkılarının bitümün viskozitesini düşürerek daha akıcı olmasını sağladığı böylelikle; agrega ile bitüm arasındaki aderansı arttırarak agreganın daha düşük bitüm miktarlarıyla kaplanma özelliğini kazandırması gösterilebilir. Buna ek olarak, köpüklendirme teknolojisi katkılarından yapay ve doğal zeolitin bitüm hacmini arttırma özelliğinin de gerekli optimum bitüm oranını düşürmekte rol oynadığı düşünülebilir.

Çalışma kapsamında, Marshall ve Superpave yöntemleri için gerekli bitüm oranları da birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Organik, kimyasal ve yapay zeolit IKA katkılarını içeren asfalt numunelerinin Marshall tasarım yöntemine göre elde edilen optimum bitüm oranları Superpave yöntemiyle elde edilenlere kıyasla

daha düşük bulunmuştur. Ancak, doğal zeolit kullanılarak hazırlanan asfalt numuneleri için belirlenen optimum bitüm oranı Superpave yönteminde daha düşük bulunmuştur. Bu sonuç, yoğurmalı pres ile yapılan sıkıştırılmalarda, filler ve doğal zeolit gibi küçük parçacıkların Marshall yöntemindeki darbeli sıkıştırma ile karşılaştırıldığında boşlukları daha iyi doldurduğu bu sayede de gerekli bitüm miktarını düşürdüğü şeklinde açıklanabilir.

Superpave tasarım yönteminin kullanımının ülkemizde yaygınlaşması için, bölge ve iklim faktörüne göre PG sınıfının, Superpave agrega kriterlerine göre agrega kısıtlarının yeniden belirlenmesi gibi çalışmaların yapılması ve elde edilen sonuçlar ışığında gerekli düzenlemelerin oluşturulması yararlı olabilir.

Ayrıca, IKA katkılı bitümler üzerinde uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite deneyleri sonucunda, IKA teknolojisinin sıcaklık duyarlılığını azalttığı, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci arttırdığı söylenebilir. Bu sayede özellikle iklim sıcaklığının geniş aralıklı olduğu bölgelerde IKA katkılarının kullanımının faydalı olabileceğini sonucu çıkartılabilir.

Uygulanan geleneksel bitüm deneyleri sonuçları, yaşlanmaya ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli asfalt elde edilebileceği fikrinin temelini oluşturmuş olsa da, yapılan çalışmaların yetersiz olduğu ve bu yüzden, sonuçların tekerlek izi, Dinamik kayma reometresi (DSR) ve Eğilme (BBR) deneyleri ile desteklenmesi gerektiği önerilmektedir.

5 Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK MAG110M567 proje numarası ile desteklenmiştir. Proje kapsamındaki destekleri için TÜBİTAK’a teşekkür ederiz. DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’ne yüksek lisans tezi kapsamında verdikleri destekler için teşekkür ederiz.

6 Referanslar

- [1] Pérez-Jiménez, F.; Martínez, A. H.; Miró, R.; Hernández-Barrera, D. ve Araya-Zamorano, L. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. Construction and Building Materials. 2014; 65, 264-269.

- [2] Sengoz, B.; Topal A.; Gorkem C. Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite, Road Materials and Pavement Design. 2013a; 14, 4.
- [3] Sengoz, B.; Topal A.; Gorkem, C. Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives, Construction and Building Material. 2013b; 43, 242-252.
- [4] Topal, A.; Sengoz, B.; Kok, B. V.; Yilmaz, M.; Dokandari, P. A.; Oner, J. ve Kaya, D. Evaluation of mixture characteristics of warm mix asphalt involving natural and synthetic zeolite additives. Construction and Building Materials. 2014; 57, 38-44.
- [5] Topal, A. ve Dokandari, P. A. Laboratory comparison of aging characteristics of warm mix asphalts involving natural and synthetic water containing additives. Materials Research, 2014; 17(5), 1129-1136.
- [6] Zhao, S.; Huang, B.; Shu, X., Moore, J. ve Bowers, B. Effects of WMA Technologies on Asphalt Binder Blending. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015; 28(2), 04015106.
- [7] Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vorobjovas, V. ve Perveneckas, Z. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties. Construction and Building Materials. 2016; 112, 800-806.
- [8] Vallerger, B.A. Recent Laboratory Compaction Studies of Bituminous Paving Mixtures. Proceeding Association of Asphalt Paving Technologists. 1951; 21, 117-153.
- [9] Maupin, G.W. Comparison of Several Asphalt Design Methods. Final Report. Virginia Transportation Research Council: A Cooperative Organization Sponsored Jointly by the Virginia Department of Transportation and the University of Virginia, VRTC, 98-R15, 1998; USA, 1998.
- [10] Habib, A.; Hossain, M.; Kaldate, R. Fager G. A. Comparison of Superpave and Marshall Mixtures for Low-Volume Roads /Shoulders, The Transportation Research Board (TRB) 77th Annual Meeting, CD-Rom, Transportation Research Board (TRB), 1998.
- [11] Brown, R. Interim Report. 31st Annual Rock Mountain Asphalt Conference: Colorado State University, USA, 2000.
- [12] Kanneganti, V. Comparison of 19 mm Superpave and Marshall Base II Mixes in West Virginia, Yüksek Lisans Tezi, West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources: Morgantown, WV., 2002.
- [13] Watson, D. E.; Brown R.; Moore J. Comparison of Superpave and Marshall Mix Performance in Alabama, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1929, 133-140: Washington D.C., 2005.
- [14] Nelson, J. Comparison of 9.5 mm Superpave and Marshall Wearing IMixes in West Virginia, Yüksek Lisans Tezi, West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources: Morgantown WV., 2005.
- [15] Namlı, R.; Kuloglu, N. Superpave ve Marshall Yöntemlerinin Deneyisel Karşılaştırması, İMO Teknik Dergi, 2007; 270, 4103-4118.
- [16] Keskin, M. Superpave Ve Marshall Dizayn Yöntemleri İle Üretilmiş Asfalt Numunelerinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerindeki Farklılıkların Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Eskişehir, 2011.
- [17] White, T.D. Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures, Asphalt Paving Technology, 1985; 54, 265-284.
- [18] Diaz, D. Evaluation of 4.75 mm Superpave Mix Criteria for West Virginia, Yüksek Lisans Tezi, West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources: Morgantown, WV., 2003.
- [19] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolu Teknik Şartnamesi: Ankara, Karayolları Genel Müdürlüğü., 2013.
- [20] Indiana Department of Transportation - INDOT. Certified Hot Mix Asphalt Technician Program, Procedures and Policies Manual: Indianapolis., 2001.
- [21] Kandhal, P. S.; Koehler W.S. Marshall Mix Design Method: Current Practices, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1985; 54, 284-303.
- [22] Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Lee, D.; Kennedy, T.W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Research and Education Foundation: Lanham MD, 1996.
- [23] Harman, T.; D'Angelo, J.A.; Bukowski, J. Superpave: Asphalt Mixture Design Workshop. Federal Highway Administration: Washington D.C., 2002.
- [24] Superpave Mix Design, 3rd ed., Asphalt Institute: Lexington Kentucky.
- [25] Asphalt Institute. Superpave Mix Design: Superpave Series No:2 (SP-2). Asphalt Institute: Lexington KY., 2001.
- [26] Nallamotheu, H.S. Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance. Yüksek Lisans Tezi, West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources: Morgantown, WV., 2003.
- [27] Buchanan, M.S.; Brown, R. Effect of Superpave Gyrotory Compactor Type on Compactor Type on Compacted Hot-Mix Asphalt Density, Transportation Research Record, 2001; 1761, 50-60.
- [28] Walker, D. Gaining experience with Warm Mix Asphalt, The Magazine of the Asphalt Institute, 2009.
- [29] Estakhri, C.; Button, J.; Alvarez, A. E. Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas. Texas Department of Transportation, 2010. 77843-3135.
- [30] Damm, K. W.; Abraham, J.; Butz, T.; Hildebrand, G.; Riebeschl, G. Asphalt flow improvers as 'intelligent fillers' for hot asphalts - a new chapter in asphalt technology. Journal of Applied Asphalt Binder Technology. 2002; 36-69.
- [31] Hurley, G. C.; Prowell, B. D. Evaluation of sasobit® for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology: Auburn, US, 2005.
- [32] Lai, J. S.; Tsai, J. Y. Evaluating constructability and properties of Advera and REVIX warm mix asphalt : final report. Forest Park, Ga.: Georgia Dept. of Education Office of Materials & Research, 2008.

- [33] Prowell, B. D.; Hurley, G. C. Warm-mix asphalt: best practices. National Asphalt Pavement Association, 2007.
- [34] Grace, W. R. Zeolite structure, Web Site of Grace Co., Mart 2016, <http://www.grace.com/EngineeredMaterials/MaterialSciences/Zeolites/ZeoliteStructure.aspx>. 2010.

- [35] Topal, A. Doğal Zeolit İçeren Ilık Karışım Asfaltların Performansları ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Sonuçların Farklı Ilık Karışım Asfalt Uygulamaları ile Karşılaştırılması, Tübitak Projesi, MAG 110M567 Final Raporu: İzmir, 2013.