

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Derya KAYA

Mart, 2014
İZMİR

ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı**

Derya KAYA

Mart, 2014

İZMİR

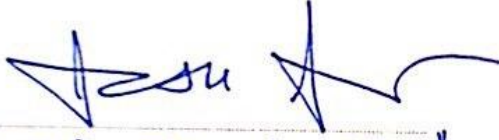
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DERYA KAYA tarafından DOÇ. DR. ALİ TOPAL yönetiminde hazırlanan "İLİK KARIŞIM ASFALTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



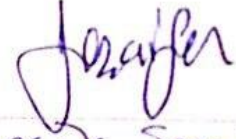
Doç. Dr. Ali TOPAL

Yönetici



Doç. Dr. Burak Sengöz

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Sevinç Şen

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yaşadığım hayatın benzersiz oluşunda, yüksek lisansı bitirmem ve buna aracılık eden tezimi yazmamda birçok insanın katkısı olmuştur. Onlardan bahsetmek ve teşekkürlerimi iletmek isterim.

İlk olarak, tez çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve disiplini ile çalışmalarına ışık tutan aynı zamanda yardımseverliği ve anlayışlılığı ile benim için çok farklı yeri olan danışmanım sayın Doç. Dr. Ali TOPAL'a yüksek mühendis olabilmemdeki tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim. Tecrübesiyle takıldığım yerlerde sonuca ulaşmamı sağlayıp bana rehberlik eden değerli hocam sayın Doç. Dr. Burak Şengöz'e ve bana kıymetli bilgiler kazandıran sayın Doç. Dr. Serhan TANYEL'e teşekkür ederim.

Bu tez, TÜBİTAK MAG 110M567 No'lu projenin bir parçası niteliğinde olduğu için desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca benden asla yardımını esirgemeyen, bana gerek bilimsel olarak gerekse kişilik olarak çok şey öğreten, hayatımdaki ağabey boşluğunu kapatan çalışma arkadaşım, Peyman AGHAZADEH DOKANDARI ve tüm Dokuz Eylül Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı çalışanlarına, Yüksek Lisans eğitimim sayesinde tanışma fırsatı yakaladığım, bana her zaman destek olan sevgili arkadaşlarım Gizem DOĞAN ve Figen COŞKUN'a, motivasyona ihtiyacım olduğunda beni asla yalnız bırakmayan Ezgi AYKOÇ, Ender YURDAM ve Abdullah ÖZCAN'a, yardımını istediğimde beni asla kırmayan yardımsever arkadaşım Çağrıhan SARIAVCI'ya, tüm üniversite hayatım boyunca hep yanımda olan Ayşegül KUZUCU'ya, son yıllarda yanımda olamasa da eksikliğini hiçbir zaman hissettirmeyen Tuğba AKPINARLI'ya, teşekkür ederim.

Ayrıca her ihtiyacım olduğunda yanımda olan, desteğini ve sevgisinin yokluğunu hissettirmeyen canım arkadaşım, kardeşim, Ezgi ARSLAN'a hayatımda olduğu ve olacağı için, içtenliği, neşesi ve bana kazandırdığı mutluluk için Gülce AVCU'ya,

liseden beri yardımseverliğinden ödün vermeyen fedakar arkadaşım Yusuf Reşat GÜNER'e, ve tabi ki, hayatımı anlamlı kılan tanıdığım en kibar ve düşünceli insan olan, hep gülmemi sağlayan Oğulcan ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim.

Son olarak, beni bugünlere getirirken maddi manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim. Bana küçük yaşlarımdan beri mücadeleyi ve adil olmayı öğreten ve her zaman arkamda olduğunu hissettiren canım babam İbrahim KAYA'ya, hep sözünü dinlediğim ve bu sayede hiç pişman olmadığım sabırlı, düşünceli ve fedakâr anneciğim Ferah KAYA'ya, dualarını hiçbir zaman esirgemeyen babanem Feride KAYA'ya beni dünyanın en şanslı kızı hissettirdikleri için çok teşekkür ederim. Ve tabi ki, iyi niyeti, temiz kalbi ve başarısıyla benim için kardeşten öte olan, hayatım boyunca örnek aldığım, neşe kaynağım değerli ablam, Gıda Yük. Müh. Zehra KAYA'ya varlığıyla hayattaki en önemli desteği verdiği için teşekkür ederim.

Derya KAYA

ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Karayolu ulaşımı, artan insan nüfusu ve gelişen teknoloji ile birlikte gün geçtikçe daha sık kullanılan bir ihtiyaç haline gelmektedir. Bu sebeple, Bitümlü Sıcak Karışıma (BSK) kıyasla daha düşük sıcaklıklarda üretildiği için insan sağlığına daha az zararlı, çevre dostu Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojisinin gelişmesi de kaçınılmaz olmuştur. Ayrıca, 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. Çevre ve insan sağlığı için daha az zararlı olan aynı zamanda uygulama kolaylığı ve enerji tasarrufu sağlayan IKA teknolojisi ile üretilen asfalt kaplamaların Superpave tasarım yöntemi ile üretilmesi ile ilgili çalışmalar ise yok denecek kadar azdır.

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. Herbir tasarım yöntemi ve IKA teknolojisinin avantaj ve dezavantajları sunulmuş, 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 belirlenmiştir ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Deneysel sonuçlara göre, her iki tasarım yönteminde de IKA katkıları ile üretilen asfalt numunelerinin optimum bitüm miktarları geleneksel bitümlü sıcak karışıma oranla daha düşük bulunmuştur. Böylece, düşük sıcaklıklarda üretilen IKA teknolojisinin ekonomik anlamda avantaj sağladığı saptanmıştır. Ayrıca, doğal zeolit

katkısı hariç diğer tüm katkıları için gerekli 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 MECHANICAL PROPERTIES OF WARM MIX ASPHALT

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, less harmful to human health and environment-friendly compared to Hot Mix Asphalt (HMA) has been unavoidable. In addition, asphalt pavement produced by the method of Marshall failure to obtain the desired performance, driving safety and ride comfort so it leads different design methods investigation. Developed in the light of this, in our country, researchs and applications of Superpave method, that takes into account the region's climate and traffic conditions is a fairly new and inadequate. The studies of Superpave method production of WMA technology which is not only less harmful to the environment and human health but also supplying ease of application and energy-saving is negligibly small.

In this study, to produce WMA by the design methods of Marshall and Superpave three kinds of WMA additives (Sasobit, Rediset, Advera) and natural zeolite may be considered to be an alternative of them, have been used. Advantages and disadvantages of each design methods and WMA technology are presented and optimum bitumen content of each asphalt sample, which produced by different design methods, determined according to the VMA, VFA and air voids value. At the end the result are compared with each other.

According to the experimental results, the optimum bitumen content of the asphalt samples produced with the WMA additives were lower than the optimum bitumen content of the hot mix asphalt. Thus, the economic advantage of WMA technology that produced at low temperatures has been provided. Additionally, required optimum bitumen content for asphalt sample that produced by the method of Marshall are lower than Superpave for all the additives except natural zeolite.

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

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	v
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xiv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Tezin Amacı	2
BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
2.1 Giriş	3
2.2 Literatür Araştırması ve Bulgular	3
BÖLÜM ÜÇ - TASARIM YÖNTEMLERİ	13
3.1 Giriş	13
3.2 Marshall Tasarım Yöntemi	13
3.2.1 Marshall Tasarım Yöntemi Tarihçesi	14
3.2.2 Marshall Karışım Tasarımı Yöntemi	15
3.2.2.1 Agrega Seçimi	15
3.2.2.2 Bitüm Seçimi	17
3.2.2.3 Numunelerin Hazırlanması	17
3.2.2.4 Yoğunluk ve Hava Boşluğu Değerlerinin Bulunması	18
3.2.2.5 Marshall Stabilometresini Kullanarak Stabilitate ve Akma Değerlerinin Bulunması	23
3.2.2.6 Optimum Bitüm Miktarı Tayini (ASTM D2172/D2172M-11)	24

3.3 Superpave Yöntemi	25
3.3.1 Superpave Yöntemi Tarihçesi.....	25
3.3.2 Superpave Karışım Tasarım Yöntemi.....	26
3.3.2.1 Agregas Seçimi	27
3.3.2.2 Bitüm Seçimi.....	31
3.3.2.3 Numunelerin Hazırlanması	31
3.3.2.4 Optimum bitüm miktarı tayini (ASTM D3387-11).....	38
BÖLÜM DÖRT - ILIK KARIŞIM ASFALT TEKNOLOJİSİ.....	40
4.1 IKA Tarihçesi.....	40
4.2 IKA Avantajları.....	41
4.2.1 Uygulama Kolaylığı.....	41
4.2.2 Çevresel Faydalar.....	42
4.2.3 Ekonomik Faydalar	44
4.3 IKA Dezavantajları.....	44
4.4 IKA Teknolojisi ve Üretim Sınıflandırılması	45
4.4.1 Organik Katkılar	46
4.4.2 Köpüklendirme Yöntemleri.....	48
4.4.3 Kimyasal Katkılar	51
BÖLÜM BEŞ- DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLARI.....	53
5.1 Malzemeler	53
5.1.1 Bitüm.....	53
5.1.2 Agregalar	54
5.1.3. Ilık Karışım Asfalt Katkıları.....	57
5.1.3.1 Sasobit®.....	57
5.1.3.2 Rediset®.....	58
5.1.3.3 Advera®.....	59
5.1.3.4 Doğal Zeolit	60
5.2 Deneysel Plan.....	63

5.2.1 IKA Katkılı Bitümlerin Üretimi	63
5.2.2 Karışım Oluşturma.....	64
5.2.3.İndirek Çekme Deneyi (IDT) ASTM D6931-12	68
5.3 Deneysel Çalışma Sonuçları	70
5.3.1 Bitüm Testi Sonuçları	70
5.3.1.1 Penetrasyon Deneyi Sonuçları (ASTM D5/D5M-13)	70
5.3.1.2 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	74
5.3.3 Karışım Deneyleri Sonuçları	77
5.3.3.1 Marshall Tasarım Yöntemi için Optimum Bitüm Miktarı Sonuçları	78
5.3.3.2 Superpave Tasarım Yöntemi için Optimum Bitüm Miktarı Sonuçları	79
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
REFERANSLAR	84
EKLER.....	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Marshall tokmağı	4
Şekil 2.2 Texas yoğurmalı presi	5
Şekil 2.3 Kaliforniya yoğurmalı presi.....	6
Şekil 2.4 100 mm ve 150 mm'lik yoğurmalı pres kalıpları	8
Şekil 2.5 Asfalt içeriklerinin karşılaştırması.	9
Şekil 2.6 Farklı karışım ve tasarım yöntemleri için optimum bitüm oranları.	11
Şekil 3.1 Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmış asfalt numuneleri.....	18
Şekil 3.2 Karışımın maksimum özgül ağırlığının belirlenmesi.....	20
Şekil 3.3 Marshall stabilometresi	23
Şekil 3.4 Teksas karayolları tarafından imal edilen ilk yoğurmalı pres	26
Şekil 3.5 Maksimum dane boyutu için maksimum yoğunluk hattı	29
Şekil 3.6. Superpave gradasyon limitleri	30
Şekil 3.7 Yoğurmalı pres cihazı ve sıkıştırma başlığı	32
Şekil 3.8 Yoğurmalı presin iç ve dış açıları	33
Şekil 4.1 Sıcaklıklara göre sınıflandırma	45
Şekil 4.2 Organik IKA katkılı bitümün sıcaklık- viskozite ilişkisi	47
Şekil 4.3 Wam-foam yöntemi.	49
Şekil 5.1 Sasobit®'in yapısı.....	58
Şekil 5.2 Rediset®'in yapısı.....	59
Şekil 5.3 Advera®'nın yapısı.....	60
Şekil 5.4 Zeolitin yapısı	62
Şekil 5.5 Doğal zeolitin yapısı	63
Şekil 5.6 IKA katkılı bitümlerin ısıtıcı kullanılarak üretilmesi.....	64
Şekil 5.7 Saf bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini.....	65
Şekil 5.8 Sasobit® katkılı bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini.....	66
Şekil 5.9 Rediset® katkılı bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini	66
Şekil 5.10 Numunenin indirekt çekme mukavemeti ölçümü için cihaza yerleştirilmesi	69
Şekil 5.11 Deney sonrası eksenel kırılmış numune	69
Şekil 5.12 Sasobit® katkılı bitüm için penetrasyon testi sonuçları.....	72

Şekil 5.13 Rediset® katkılı bitüm için penetrasyon testi sonuçları.....	72
Şekil 5.14 Advera® katkılı bitüm için penetrasyon testi sonuçları.....	73
Şekil 5.15. Doğal zeolit katkılı bitüm için penetrasyon testi sonuçları	73
Şekil 5.16 Sasobit® katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları.....	76
Şekil 5.17 Rediset® wmx katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları.....	76
Şekil 5.18 Advera® katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları.....	77
Şekil 5.19 Doğal zeolit katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları	77
Şekil 5.20 Marshall yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri .	79
Şekil 5.21 Superpave yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri	80

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Aşınma tabakası Tip-1 gradasyon için şartname sınır değerleri.....	16
Tablo 3.2 Farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörü.....	24
Tablo 3.3 Marshall tasarım yöntemi kriterleri.....	25
Tablo 3.4 Kontrol noktaları limit değerleri	30
Tablo 3.5 Yasak bölge limit değerleri	31
Tablo 3.6 Superpave karışımları için karayolu sınıflandırmaları.....	34
Tablo 3.7 Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri.....	34
Tablo 3.8 Superpave karışım tasarımı kriterleri.....	38
Tablo 4.1 IKA üretimi süresince emisyon emilimi	43
Tablo 4.2 IKA teknolojisine genel bakış	46
Tablo 4.3 Organik IKA katkı çeşitleri	48
Tablo 4.4 Ika köpüklendirme teknolojisinin başlıca çalışmaları.....	50
Tablo 4.5 Kimyasal katkılar	52
Tablo 5.1 Saf bitüm için laboratuvar test sonuçları.....	54
Tablo 5.2 Deneylerde kullanılan agreganın fiziksel özellikleri	55
Tablo 5.3 Kullanılan agrega gradasyonu	56
Tablo 5.4 Zeolitin kimyasal yapısı	61
Tablo 5.5 Üretim sıcaklık ve süreleri.....	64
Tablo 5.5 Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	67
Tablo 5.6 TFOT öncesi ve sonrası penetrasyon testi sonuçları.....	71
Tablo 5.7 RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon testi sonuçları	71
Tablo 5.8 TFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	74
Tablo 5.9 RTFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları	75

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Türkiye’de 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 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 yöntemine geçiş sürecinde, yöntemlerin ülkemiz koşulları açısından karşılaştırılması gerekmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri’nde 1987 yılında başlayan ve geliştirilmekte olan Superpave yöntemi ile ilgili ülkemizdeki akademik düzeydeki çalışmalar son 10-15 yılı kapsamaktadır. Bu çalışmaların bir sonucu olarak, Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Daire Başkanlığı bünyesindeki laboratuvarlara ve Bölge Müdürlüklerindeki üstyapı laboratuvarlarına Superpave yönteminde kullanılan laboratuvar cihazlarının alımını başlatmıştır.

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. Ülkemizde 90’lı yıllardan beri Marshall yöntemi kullanılmasına rağmen, Superpave tasarım yöntemi dünyada gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu sebeple, Superpave yöntemini kullanan ve geçiş yapan ülkelerde tasarım yöntemlerinin özelliklerinin kıyaslanması amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

İnsan sağlığı ve çevreye verilen zararın minimuma indirilmesi amacıyla yapılan benzer çalışmalarda ise, bitümlü sıcak karışımın (BSK) üretiminin ve seriminin yüksek sıcaklıklarda yapılması nedeni ile evre sağlığına daha az zarar verdiği tespit edilen, ayrıca; enerji kullanımı açısından daha ekonomik özümmler sunan Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojisinin temelleri atılmıştır.

İlk kez 1956 yılında Iowa üniversitesi tarafından geliştirilmeye başlatılan IKA teknolojisi ile ilgili araştırmalar ölkemizde başlangıç aşamasındadır. Bu konuda Dokuz Eylül Üniversitesi 2010 yılında başladığı Tübitak projesi ile konuya öncülük etmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından başlatılan bir diğer proje ile araştırma çalışmaları artarak devam etmektedir. IKA teknolojisinde çeşitli katkılar yardımıyla asfalt viskozitesi düşürölerek işlenebilirliğin arttırılması amaçlanmaktadır. Bu sayede, BSK'ya kıyasla daha düşük sıcaklıklarda uygulama kolaylığı, enerji tasarrufu ve ekolojik faydalar sağlanmaktadır. 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 ele alınması gerekmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Amerika'da ortaya çıkan ve tüm dünyada yaygınlaşan Superpave yöntemi, Türkiye'de yapılan araştırmaları açısından oldukça yenidir. Kısıtlı doğal kaynaklar, gün geçtikçe artan küresel ısınma ve hava kirliliğine tepki olarak ortaya çıkan evre dostu IKA uygulamaları ile ilgili Superpave yöntemi araştırmaları ise başlangıç aşamasındadır. Bu tez kapsamında, farklı IKA katkıları ile üretilmiş asfalt numuneleri Superpave ve Marshall tasarım yöntemleri ile üretilerek sonuçları birbirleri ile ve BSK karışımları ile optimum bitüm miktarları açısından kıyaslanmıştır. Böylece, IKA katkılı asfalt numunelerin üretim aşamasında, yoğurmalı ve darbeli yöntemlere göre hava boşluğu, VMA, VFA özelliklerindeki değişimin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Giriş

En eski mühendislik malzemelerinden biri olan asfaltın ilk kez yol yapımında kullanılması M.Ö. 600 yılında Babil’de gerçekleştirilmiştir. BSK ise gelişen teknoloji ile birlikte ilk kez 1873 yılında Birleşmiş Milletler Washington D.C.’de, asfalt kaplaması olarak kullanılmıştır. Karayollarına duyulan ihtiyacın gün geçtikçe artması ile birlikte daha hızlı ve güvenilir asfalt kaplama üretimi için belirli kriterlere bağlı olarak üretim yapılması gerektiği düşünölmeye başlanmıştır. Bu sayede 1940’lı yıllarda asfalt kaplama tasarım yöntemi olarak geliştirilen Marshall yönteminin ölkemizde kullanılmaya başlaması 90’lı yılları bulmuştur 1990’lı yılların ortalarında artan trafik hacimleri ve trafik yükleri sebebiyle Marshall yöntemi ile üretilen yollarda sürüş konforu ve seyahat emniyetini olumsuz etkileyen bozulmaların gerçekleşmesi üzerine karayolu mühendisleri ABD’de Superpave tasarım yöntemini oluşturup, kullanmaya başlamıştır (Roberts, Brown ve Kennedy, 1996).

2.2 Literatür Araştırması ve Bulgular

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 (Valerga, 1951).

Consuerga ve arkadaşları tarafından NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) işbirliği ile yürütölen çalışmada ise, hareketli çelik tekerlek simölatorü, Marshall kompaktörü (Şekil 2.1), Texas yoğurmalı pres (Şekil 2.2), Kaliforniya yoğurmalı pres (Şekil 2.3), Arizona titreşimli-yoğurmalı kompaktör olmak üzere beş farklı cihaz ile sıkıştırılan numuneler sahadan alınan karot örnekleri

ile sıkıştırma oranları açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda esneklik modülü, indirekt çekme mukavemeti, yıkım anındaki deformasyon ve çekme sünme deney verisi açısından araziden alınan karotlara en yakın sonucu Texas yoğurmalı pres ile üretilen numunelerin verdiği görülmüştür. Bunu takiben, Kaliforniya yoğurmalı presi ve hareketli çelik tekerlek simülatörü ikinci ve üçüncü sırada yer almaktadır. Marshall tokmağı ile sıkıştırılan karot örnekleri ise arazi koşullarında üretilen kaplama numunelerine esneklik modülü, indirekt çekme mukavemetleri, yıkım anındaki deformasyon ve çekme sünme deney verisi açısından en uzak sonuçları vermiştir (Consuerga, Little, Von Quintos ve Burati, 1989)



Şekil 2.1 Marshall tokmağı

Sıkıştırma tekniklerinin kıyaslandığı benzer bir çalışmada ise, Button ve arkadaşları, Exxon dönen tekerlek, Texas yoğurmalı pres, dönen başlı Marshall kompaktörü, Elf doğrusal yoğurmalı kompaktör ile üretilen numunelerin malzeme davranışlarını kıyaslamışlardır. Bu amaçla numuneler üzerinde uygulanan testlerin sonuçları sahadan alınan karot numuneleri ile beraber incelenmiştir. Bu çalışmada da en yakın sonucu %73 benzerlik ile Texas yoğurmalı pres ile üretilen numuneler vermiştir. Bunu takiben, %64 ile Exxon ve Elf kompaktörleri, en son ise %50 gibi düşük bir oranla Marshall kompaktörü gelmektedir. Çalışma sonucunda, yoğurma esasına dayanarak üretilen numunelerin araziye daha iyi temsil ettikleri kanaatine varılmıştır (Button, Little, Jagadam ve Pendelton, 1994).



Şekil 2.2 Texas yoğurmalı presi (Harman, Bukowski, Moutier, Huber ve McGennis, 2001)

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 (Maupin, 1998).

Khan ve arkadaşları ise, farklı kompaktörlerin kıyaslanmasının yanısıra Superpave yönteminde yoğurma açısının numunelere etkisini de araştırmışlardır. Marshall otomatik ve manuel kompaktörü ile Kaliforniya yoğurmalı pres cihazının $1,25^\circ$ ve 6° olmak üzere iki farklı yoğurma açısı kullanılarak farklı numuneler üretmişlerdir. Araziden gelen karot örnekleri ile üretilen bu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, hava boşlukları, hacimsel özgül ağırlıkları, esneklik modülleri ve statik sünme davranışları kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, $1,25^\circ$ yoğurmalı pres açısı ile üretilen numunelerin mühendislik tasarım özellikleri açısından arazi koşullarında sıkıştırmaya en yakın sonuçları verdiği görülmüştür (Khan, Al-Abdul Wahab, Asi, ve Ramadhan, 1998).



Şekil 2.3 Kaliforniya yoğurmalı presi

Suudi Arabistan’da yürütülen farklı bir çalışmada, $1,25^\circ$ ile 6° açılı Kaliforniya yoğurmalı presler kullanılarak üretilen Superpave numunelerinin ve Marshall otomatik ve manuel kompaktörü ile sıkıştırılan asfalt numunelerinin arazideki sıkışma oranı açısından gerçeğe uygunluğu elastisite modülü ve hacimsel özgül ağırlık gibi parametrelere dikkat edilerek incelenmiştir. Çalışma sonucunda, $1,25^\circ$ ile üretilen numunelerin arazideki sıkışma oranına en yakın, 6° ile üretilenlerin ise ikinci en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Marshall otomatik tokmağı araziye göre en yanıtıcı sonuçları veren sıkıştırma cihazı olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, yoğurmalı pres ile hazırlanan numunelerin hava boşluğu açısından da en gerçekçi sonuçları verdiği görülmüştür (Ziauddin, Hamad, Ibrahim, ve Rezgallah, 1998).

Habib ve diğerleri ise, 1998 yılında Superpave yönteminin düşük hacimli yollarda kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlar, elde ettikleri sonuçları da Marshall yöntemi sonuçları ile kıyaslamışlardır. Araştırmacılar, Marshall yönteminin avantajlarından bir tanesini, tasarımın yerel koşullara ve malzemelere göre yapılması olarak göstermişlerdir. Fakat Superpave yönteminin, tekerlek izi, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları gibi parametrelere de dikkat çektiği için evrensel olarak da kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca, banket kaplamalarının tasarımında Superpave yönteminin kullanılabilirliği de araştırılmıştır. Bu sayede, düşük N_{des} değerlerinin hacimsel özelliklerinin de irdelenmesi sağlanmıştır. Sonuç

olarak, trafik hacmi düşük olan yollarda optimum bitüm miktarı Marshall yöntemine kıyasla %0,7 daha düşük olan Superpave tasarım yöntemi daha ekonomik bulunmuştur (Habib, Hossain, Kaldate ve Fager, 1998).

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 (Brown, 2000).

Buchanan ve Brown da çalışmalarında Superpave yönteminin arazi şartlarını daha iyi temsil ettiğini belirtmiştir. Ancak, özgül ağırlık değerlerinde arazi şartlarına göre farklılıklar olduğunu görmüşler, bunun sebebi olarak da karışım oluşturma ve özelliklerini inceleme aşamasındaki laboratuvar koşullarının arazi koşullarından farklı olmasını göstermişlerdir (Buchanan ve Brown, 2001).

Superpave yöntemi ile yapılmış çalışmaların çoğu 150 mm'lik kalıplar kullanılarak yapılmıştır. Jackson ve Czor ise 100 mm ve 150 mm'lik (Şekil 2.4) kalıplar kullanarak ürettiği asfalt numunelerin özelliklerini kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda, çok büyük farklılıklar olmadığı görülmüştür. Fakat; 100 mm'lik kalıplar kullanılırken kullanılacak maksimum agrega boyutuna dikkat etmek gerektiğini vurgulamışlardır (Jackson ve Czor, 2003).



Şekil 2.4 100 mm ve 150 mm'lik yağurmalı pres kalıpları

McGennis ve arkadaşları ise, benzer çalışmayı gerçekleştirmişler ancak 100 mm ile 150 mm'lik kalıplarla hazırlanan numunelerin birbirinden çok farklı sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Ayrıca çalışmada 150 mm'lik kalıplar için şartnamenin var olduğu, ancak 100 mm'lik kalıplar için bir şartname olmamasının eksikliği vurgulanarak, bu konuda araştırma yapılması gerekliliği vurgulanmıştır (McGennis, Anderson, Perdomo ve Turner, 1996).

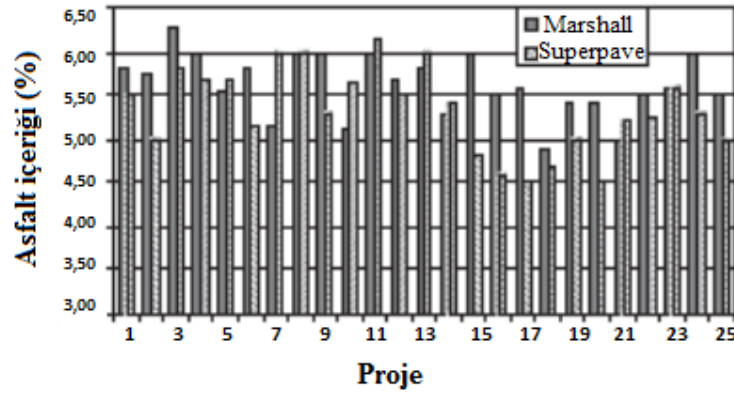
2002 yılında Kanneganti tarafından yapılan çalışmada, Batı Virjinya'daki maksimum nominal agrega boyutu 19 mm olan asfalt karışımların yüksek trafik hacimli yollar için Marshall ve Superpave yöntemleri ile tasarımları araştırılmış ve elde edilen sonuçları birbirleri ile kıyaslamıştır. Araştırmacı yaptığı 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 (Kanneganti, 2002).

Diaz'ın 2003 yılında Amerika'da yaptığı çalışmada, agrega gradasyonundaki maksimum nominal agrega boyutu 4,75 mm olan ve düşük trafik hacmine sahip yollarda Marshall yöntemi ile üretilen asfalt numunelerin optimum bitüm miktarının Superpave'e kıyasla daha yüksek olması gerektiğini ifade etmiştir (Diaz, 2003).

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 değer in iklim ve trafik koşullarına göre değiştiğini belirtmişlerdir. Yüksek N_{des} değeri ile sıkıştırılan numunelerin tekerlek izine karşı dirençlerinin yüksek olduğunu ancak; bununla birlikte çatlak ve durabilite problemlerine de sebep olduğunu, bu nedenle; N_{des} değerini belirlerken, tekerlek izi, çatlak ve durabiliteye karşı mukevemetin optimizasyonunun yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Aynı çalışmada, Superpave yönteminin Marshall yöntemine kıyasla daha yüksek trafik hacmi olan yollarda kullanımının daha uygun olduğu anlaşılmaktadır (Watson, Brown ve Moore, 2005).

Aynı çalışmada, Alabama'daki Marshall ve Superpave yöntemleri ile tasarlanmış 200 asfalt yol projesi içerisinde servis yılı, trafik koşulları, karışım tipi, agrega tipi, bitüm tipi, gradasyon eğrisi ve iklim özellikleri olabildiğince yakın 25'er projenin tasarım yöntemlerine göre bitüm miktarlarını kıyaslanmasına da yer verilmiştir. Seçilen projelerin bitüm içeriklerinin kıyaslanması Şekil 2.5'de gösterilmiştir (Watson ve diğer., 2005)



Şekil 2.5 Asfalt içeriklerinin karşılaştırması (Watson ve diğer., 2005).

Şekil 2.5'de görüleceği üzere, alınan numunelerin yarısından fazlasında Marshall yöntemi ile üretilen asfalt kaplamaların bitüm içeriği daha yüksek çıkmış olsa da, Superpave yöntemi ile üretilip daha yüksek bitüm miktarı içeren örnekler de mevcuttur. 4 yıllık servis ömürlerinden sonra Marshall ve Superpave yöntemleri ile tasarlanmış kaplamalardan alınan numunelerin çoğunun düşük tekerlek izi ve çatlak potansiyellerine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, çoğu asfalt numunesinin 4 yılın

sonunda her iki yöntemin de tasarım kriteri olan %4 boşluk oranına erişmediği, daha yüksek boşluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ortalama boşluk oranları Marshall yöntemi ile tasarlanan yollarda %5,3 iken bu değer Superpave yöntemi ile tasarlanan yollarda %5,9'a kadar yükselmiştir (Watson ve diğer., 2005).

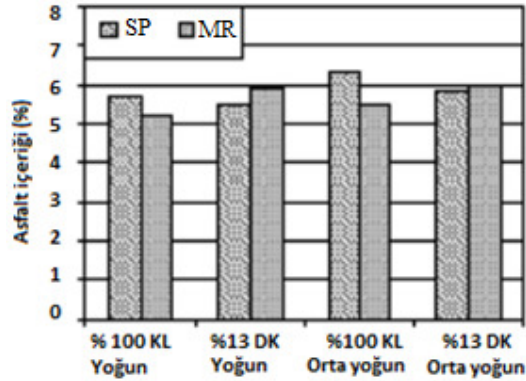
2007 yılında Harmelink ve arkadaşları Colorado eyaletinde yaptıkları benzer araştırmada Superpave ile tasarlanan yolların %4 boşluk oranına yolun hizmete açıldığı altıncı senenin sonunda eriştiklerini bulmuşlardır (Harmelink, Aschenbrener ve Shuler, 2007).

2007 yılının sonlarında Aguiar-Moya ve arkadaşları, Superpave yönteminin optimum yoğurma sayısının tespitini araştırmışlardır. Daha düşük N_{des} değerinin optimum bitüm yüzdesini düşürdüğünü, böylece Superpave esaslarına göre tasarlanan numunelerin daha sert ve daha az esnek olduklarını belirtmişler ve buna bağlı olarak, yorulma çatlaklarının oluşabileceğini vurgulamışlardır. N_{des} değerinin, sadece trafik yükü ve iklim koşullarına göre değil, aynı zamanda kullanılan bitümün özellikleri ile agrega tipi ve gradasyonuna göre de değişeceğini söylemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, Brown ve Mallick'in 1998 yılındaki çalışmalarında ortaya koyduğu gibi, Superpave yönteminde belirtilen N_{des} değerinin 30 birim aşağısında yoğurma yapılması gerektiğini belirtmişler ve bu konuda daha fazla araştırma yapılmasını önermişlerdir (Aguiar-Moya, Prozzi, ve Tahmoressi, 2007).

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. Asfalt kaplama stabilitesinin agrega parçacıklarının birbirleri ile sürtünmesine bağlı olduğunu, bu nedenle, darbe ile sıkıştırma esasına dayanan Marshall tasarım yönteminde numunelerin stabilite değerlerinin şartname sınırlarında olup olmadığının kontrolünün yapılması gerektiğini vurgulamıştır (Nelson, 2005).

Aynı çalışma kapsamında iki farklı tip agrega karışımı kullanılarak Marshall ve Superpave yöntemleri için optimum bitüm oranları belirlenmiş ve kendi içlerinde

kıyaslanmıştır. Kullanılan agrega tiplerinden bir tanesi, kalkerden (KL) oluşurken diğer agrega karışımı ise kalkere ek olarak %13 oranında Ohio nehrinden elde edilen kumdan (DK) da içermektedir. Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen optimum bitüm oranları Şekil 2.6’de verilmiştir.



Şekil 2.6 Farklı karışım ve tasarım yöntemleri için optimum bitüm oranları (Nelson, 2005).

Bu sonuçlara göre, %100 kalker içeren numunelerde optimum bitüm oranı Superpave tasarımında Marshall tasarım yöntemine kıyasla daha yüksek sonuçlar verirken, %13 kum içeren numuneler de şaşırtıcı bir şekilde bu durum tam tersine dönmüştür. Yani, doğal kum gibi küçük çaplı parçacıklar içeren numuneler yağurma esaslı Superpave yönteminin boşluk oranını düşürmektedir. Böylelikle, optimum bitüm oranında da azalma yaşanmaktadır (Nelson, 2005).

Hindistan’da 2004 yılında Swami ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmalarda, Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri kıyaslanmıştır. Marshall tasarım yönteminde daha önceki üretim ve kullanım deneyimleri ile istatistiksel analizler kullanılırken, Superpave tasarım yönteminde ise trafik ve iklim gibi özellikler ön plana çıkmaktadır Buna bağlı olarak, Superpave tasarım yönteminin geliştirilmeye daha müsait olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca, yapılan suya hassiyet deneyleri de, Marshall tasarım yöntemi ile hazırlanan numunelerin sudan daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Optimum bitüm miktarı tayini deneylerinin yapılmasının ardından, Superpave tasarım yöntemi için optimum bitüm miktarı Marshall tasarım yöntemine kıyasla yaklaşık olarak %0,9 daha düşük bulunmuştur. Superpave tasarım yönteminde stabilite ve akma değerleri birer tasarım kriteri olmamalarına rağmen

tespit edilmiş ve sonuç olarak yoğurma işlemi ile üretilen Superpave numunelerinin stabilite değerleri %27 gibi belirgin bir oranla daha yüksek bulunmuştur (Swami, Mehta ve Bose, 2004).

2007 yılında Oliver, Alderson ve Milne tarafından yapılan çalışmalarda, Superpave tasarımı yönteminde kullanılan yoğurma sayıları incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, Marshall tasarımı yöntemindeki 35 vuruş için 50, 50 vuruş için 80, 80 vuruş için ise 120 yoğurma sayısının uygun olduğu belirtilmiştir (Oliver, Alderson ve Milne, 2007).

Namlı ve Kuloğlu tarafından 2005 yılında yapılan bir çalışmada ise, Superpave ve Marshall tasarımı 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 karışımı tasarımı yönteminde, bu oranının daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, Superpave tasarımı yönteminde agrega gradasyonu, bitüm seçimi ve sıkıştırma tekniklerindeki farklılıklara da değinen araştırmacılar, bu yöntemin Türkiye’de kullanımının gerekliliğini vurgulamışlardır (Namlı ve Kuloğlu, 2005).

Keskin tarafından benzer çalışmaların yapıldığı 2011 yılında sunulan yüksek lisans tezi kapsamında, Superpave yöntemi ile katkısız ve polipropilen katkılı asfalt numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri kıyaslanmıştır. Numunelerin oluklanmaya karşı dirençleri tekrarlı sünme deneyleri ile ölçülmüştür. Tez kapsamında ayrıca, Superpave tasarımı yönteminde 100 mm çaplı kalıpların kullanımı ile ilgili de araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmaların sonucunda, Superpave tasarımı yöntemi ile üretilen numunelerin optimum bitüm oranlarının Marshall tasarımı yöntemine kıyasla daha düşük ve oluklanmaya karşı ise daha dirençli oldukları saptanmıştır (Keskin, 2011).

BÖLÜM ÜÇ

TASARIM YÖNTEMLERİ

3.1 Giriş

Ulaşım imkanlarını kolaylaştıran, rahat ve konforlu bir ulaşım sağlayan asfalt karayolları belirli tasarım yöntemlerine göre üretilmektedir. 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 yapıyor oluşu, bazı durumlarda istenilen performans seviyesine erişimi engellemektedir. Ayrıca; tokmak yardımıyla darbeli sıkıştırma uygulanması, karayolunun trafik etkisiyle arazideki sıkışma şeklini doğru temsil etmemesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte darbeli 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 (Keskin, 2011). Ancak; Superpave tasarım yönteminde kullanılan ekipmanlar diğer yöntemlere kıyasla biraz daha masraflıdır.

3.2 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 (White, 1985).

Marshall Metodu, istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerini sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır (Kanneganti,2002).

3.2.1 Marshall Tasarım Yöntemi Tarihçesi

II. Dünya Savaşı süresince, Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği (USCOE) havaalanı inşaatında kullanılmak üzere çeşitli BSK dizayn yöntemleri araştırmaya başlamıştır. Daha büyük askeri uçakların kullanılmaya başlanması, dizayn yöntemlerinin değiştirilmesi ve artan tekerlek yükleri ile lastik basınçlarına dayanıklı yöntemlerin geliştirilmesi zorunluluğunu yaratmıştır (Nelson, 2005).

Araştırmalar sonucunda, en umut verici yöntemin 1939 yılında Karayolları Mississippi Departmanı'nda Bruce G. tarafından geliştirilen Marshall Stabilite yöntemi olduğuna kanaat getirilmiştir. Marshall tasarım yöntemi, 1950'li yıllara kadar, trafik yükü ve hava koşulları değişkenleri altında malzemeler üzerinde çeşitli testler yapılarak geliştirilmiştir. 1954 yılında, stabilite, akma, yoğunluk ve hava boşluğu gibi hacimsel kriterler belirlenmiş ve 1973 yılında Asfalt Enstitüsü tarafından Marshall tasarım yöntemine eklenmiştir (Diaz, 2003).

Bugün Marshall yöntemi, eksikliklerine rağmen, belki de dünyanın en yaygın olarak kullanılan karışım tasarımı yöntemidir. Bu kadar yaygın kullanılmasının nedeni olarak yöntemin şu avantajları gösterilebilir: (White, 1985):

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

3.2.2 Marshall Karışım Tasarımı Yöntemi

Marshall karışım tasarımı 6 adımdan oluşmaktadır. Bunlar:

- Agregas seçimi
- Bitüm seçimi
- Numunelerin hazırlanması (sıkıştırma işlemini de kapsamaktadır.)
- Yoğunluk ve hava boşluğu değerlerinin bulunması
- Marshall Stabilometresini kullanarak stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarı tayini

3.2.2.1. Agregas Seçimi

Marshall karışım tasarımında kullanılacak agregaların üzerinde, sertlik ve aşınma, durabilite ve sağlamlık, parçacık şekli ve yüzey dokusu gibi deneyler uygulanarak fiziksel özellikleri değerlendirilir. Yapılan deneyler sonucunda fiziksel özellikler karışımında kullanılmak için yeterli görülürse, agregalar üzerinde elek analizi, özgül ağırlık ve absorpsiyon deneyleri yapılır (Roberts ve diğer., 1996).

Agregalar segregasyonu önlemek amacıyla boyutlarına göre sınıflandırılarak stoklanırlar. Karışım oluşturmadaki ilk adım farklı boyuttaki agregaların kullanım oranlarının belirlenmesi ve böylece şartname sınırları içerisinde kalan bir gradasyonun kullanılmasıdır (Diaz, 2003). 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 agregas ile filler yüzdelerinin şartnamede verilen sınırlar içerisinde kalması ve VMA değerlerinin istenilen değerlerde çıkması amacıyla 0,45 üslü gradasyon grafiğine çok yakın olmaması gerekmektedir. Tablo 3.1.'de Marshall tasarım yöntemiyle tasarlanacak aşınma tabakası Tip-1 gradasyonu için şartname sınır değerleri verilmiştir.

$$p = A_a + B_b + C_c \quad (3.1)$$

Burada:

A, B, C, ...= Herbir A, B, C... agregası için belirli bir elekten geçen malzeme yüzdesi

a, b, c, ...= Karışımında kullanılan A, B, C... agregalarının boyutları

P = A, B, C... agregalarından oluşan karışım için belirli bir elekten geçen malzeme yüzdesi

$$G = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (3.2)$$

Burada:

$G_1, G_2, \dots, G_n = 1, 2, \dots, n$ bölümleri için özgül ağırlık değerleri

$P_1, P_2, \dots, P_n = 1, 2, \dots, n$ bölümleri için ağırlık yüzdeleri

G = Karışım özgül ağırlığı

Tablo 3.1 Aşınma tabakası Tip-1 gradasyon için şartname sınır değerleri (KTŞ), 2013)

Elek numarası (elek çapı mm)	Şartname Sınırı
$\frac{3}{4}$ " (19 mm)	100
$\frac{1}{2}$ " (12,5 mm)	88-100
$\frac{3}{8}$ " (9,5 mm)	72-90
No 4 (4,75 mm)	42-52
No 10 (2,00 mm)	25-35
No 40 (0,425 mm)	10-20
No 80 (0,180 mm)	7-14
No 200 (0,075 mm)	3-8

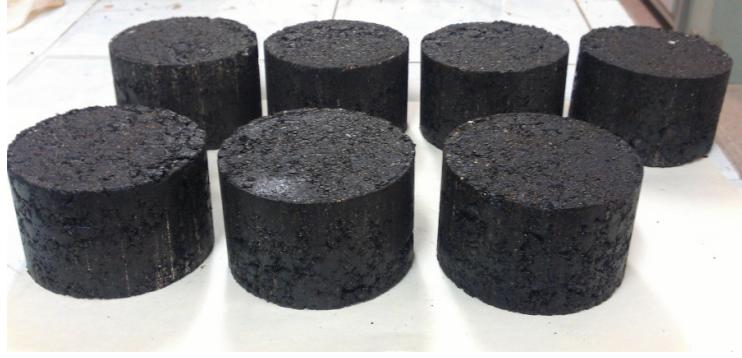
3.2.2.2 Bitüm Seçimi

Marshall Tasarım yönteminde kullanılan genel bir bağlayıcı türünden bahsedilemez. İstenilen özelliklerdeki bitümü elde etmek için, farklı katkı maddeleri kullanılarak modifiye bitümler elde edilebilmektedir. Marshall tasarım yönteminde bitümler penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılır ve penetrasyon sınıfı; kullanılacağı bölgenin iklim özellikleri doğrultusunda değişmektedir.

3.2.2.3 Numunelerin Hazırlanması

Marshall yönteminde, her bir bitüm yüzdesi için en az üç farklı deney numunesi hazırlanması gerekmektedir (Kanneganti, 2002). Kullanılacak agregalar gradasyon hazırlanmadan önce $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde içeriğindeki nemi kaybetmesi amacıyla ağırlığı sabitlenene kadar kurutulur. İçeriğindeki nemlerden kurtulan agregalar, şartname sınırları içerisinde belirlenen gradasyona göre (yaklaşık 1150 gr.) hazırlanır ve agregaya etüvlerine konularak karıştırma sıcaklığına ($150-165^{\circ}\text{C}$) erişmesi beklenir. İstenilen karıştırma sıcaklığına gelen agregalar farklı etüvde ısıtılmış ($145-160^{\circ}\text{C}$) bitüm ile karıştırma kabına konularak mikser yardımı ile agregalar bitüm ile tamamen kaplanana kadar karıştırılır (KTŞ, 2013).

Karıştırma işleminin ardından elde edilen bitüm-agrega karışımı, 101,6 mm çapında ve 76,2 mm yüksekliğindeki Marshall kalıplarına konur. Belirlenen sıkıştırma sıcaklığı aralığında kalacak şekilde soğuyan karışım, Marshall kompaktörüne yerleştirilerek Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) Aşınma Tabakası Tip-1 için belirtilen şekilde, her iki yüzeyine de 75'er darbe vurulur (KTŞ, 2013). Sıkıştırma işleminin ardından numuneler, oda sıcaklığına geldiklerinde kriko yardımıyla kalıplardan zarar görmeden çıkartılır. Şekil 3.1'de Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmış asfalt numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmış asfalt numuneleri

3.2.2.4 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 ve numunenin özgül ağırlığının 1000 ile çarpılmasıyla kg/m^3 birimi ile hesaplanmaktadır. Numunenin havadaki ve 25°C 'de 5 dk. bekledikten sonra sudaki ağırlığı ölçülür. Sudan çıkartılan numunelerin yüzeyleri bez yardımı ile kurutulur ve böylelikle doymuş yüzey kuru ağırlıkları hesaplanır.

Elde edilen ağırlıklar kullanılarak sıkıştırılmış numunelerin ağırlıkları aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.3)$$

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. Maksimum özgül ağırlık, hava boşluğu içermeyen numunenin özgül ağırlığını temsil etmektedir. İstenilen miktarda bitüm oranıyla hazırlanan agregalar gerekli sıcaklıkta karıştırılır ve sıkıştırmaya hazır hale getirilir. Ardından soğuması için kürek yardımıyla sürekli karıştırılarak elin değebileceği sıcaklığa getirilir. Vakumlanmaya müsait ölçekli cam piknometreye konulan gevşek karışımın ağırlığı tartılır ve yüzeyi tamamen kaplanana kadar saf su ilavesi yapılır. Sarsma tablasının üzerine konulan düzenek 15±2 dk. boyunca 30 mmHg'lık basınçla vakumlanır (Şekil 3.2). Vakum işleminin ardından piknometre gevşek karışım ile birlikte tamamen saf su ile doldurulur ve tartılır. Kaydedilen veriler kullanılarak maksimum özgül ağırlık aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)} \quad (3.4)$$

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)



Şekil 3.2 Karışımın maksimum özgül ağırlığının belirlenmesi

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:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (3.5)$$

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:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (3.6)$$

Burada:

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

P_s = Karışımdaki agrega yüzdesi

G_{se} = Agregaların efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

- *Hava Boşlukları*

Hava boşlukları sıkıştırılmış BSK içerisinde asfaltla kaplanmış agrega parçaları arasında oluşan küçük hava tanecikleri 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 yanısıra, çok düşük olan hava boşluğu oranları ise, BSK içerisindeki bitümü sıkıştırarak yüzeye çıkıp “kabarma” yaratmasına sebep olur (Indiana Department of Transportation (INDOT), 2001).

Yoğunluk ile hava boşluğu doğrudan ilişkilidir. BSK’larda yoğunluk arttıkça, hava boşluğu oranı azalır (Diaz, 2003). Teknik Şartnamelerde, kaplamaların yoğunluğunun, gerekli hava boşluğunu sağlayacak şekilde seçilmesi gerektiği belirtilmektedir.

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

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (3.7)$$

Burada:

VTM = Karışımdaki 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 (Kandhal ve Koehler, 1985). VMA, bitüm ve hava boşluğu ile dolu olan alanların tümünü kapsamaktadır ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VMA = 100 \left[1 - \frac{G_{mb} (1 - P_b)}{G_{sb}} \right] \quad (3.8)$$

Burada:

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

G_{sb} = Agregaların karışımının özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

- *Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)*

Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi, VFA, sıkıştırılmış karışımdaki agregaların parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluğu temsil etmektedir. Başka bir deyişle, bitümle dolu boşluk yüzdesi olarak da söylenebilir (INDOT, 2001). Karışım içerisindeki VFA ihtiyacının amacı, mineral agregalar arasındaki maksimum boşluğu ve buna bağlı olarak asfalt içeriğini sınırlamaktır. VFA yüzdesi şöyle hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100 \quad (3.9)$$

Burada:

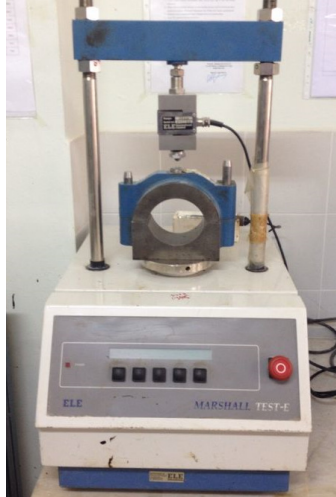
VFA = Karışımındaki bitüm ile dolu boşluk yüzdesi

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

VTM = Toplam karışımın boşluk oranı

3.2.2.5 Marshall Stabilometresini Kullanarak Stabilite Ve Akma Değerlerinin Bulunması

Stabilite ve akma değerleri, Marshall stabilometresi cihazı kullanılarak bulunmaktadır. Hazırlanan farklı bitüm oranlarındaki herbir asfalt numunesi kırım işlemi yapılmadan önce, 60°C sıcaklığındaki su banyosunda sıcaklık kontrolü yapılarak 30-40 dakika süresince bekletilir (Roberts ve diğer., 1996). Süre sonunda numuneler su banyosundan çıkartılarak hızlıca kurulanır ve Marshall test cihazına ait kırma kafasına yerleştirilir (tüm işlemler yaklaşık 30 sn. sürmelidir). Akma değerini okumayı sağlayan flowmetrenin de kırma kafasındaki yerine yerleştirilmesinden sonra cihaz çalıştırılır. Şekil 3.3’de yer alan Marshall stabilometresinin yükleme hızı 50,8 mm/dak. olmalıdır.



Şekil 3.3 Marshall stabilometresi

Cihaz, stabilite ve akma değerleri sabit hale geldiği anda otomatik olarak yüklemeyi durdurur. Akma değeri, numunenin düşey deformasyon değerine eşittir (Roberts ve diğer., 1996) Cihazın kaydettiği veriler ekrandan okunur. Ancak,

stabilite okuması sadece 63,5 mm'lik numuneler için doğru sonuç vermektedir. Bu yüzden, farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörleri geliştirilmiştir. Tablo 3.2.'de farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörleri verilmiştir. Düzeltilmiş akma ve stabilite değerlerinin şartname sınırları içinde olup olmadıklarının mukayesesi amacıyla tabloda gerekli yerlere kaydedilir.

Tablo 3.2. Farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörü

Numune yüksekliği (mm)	Düzeltilme Katsayısı
58,7	1,14
60,3	1,09
61,9	1,04
63,5	1,00
65,1	0,96
66,7	0,93
68,3	0,89
69,8	0,86
71,4	0,83
73,0	0,81
74,6	0,78
76,2	0,76

3.2.2.6 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 şartnamelerde verilen sınırlar içerisinde kalması suretiyle %4 hava boşluğu sağlayan bitüm miktarı 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. Tablo 3.3.'de Aşınma Tip-1 gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım yöntemi kriterleri verilmiştir (KTS, 2013).

Tablo 3.3 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

3.3 Superpave 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 (Harman, D’Angelo ve Bukowski, 2002). Sadece %4 hava boşluğu kriterine sahip bu yöntemde numunelerin sıkıştırılması için yağurmalı pres cihazı kullanılmaktadır.

3.3.1 Superpave Yöntemi Tarihçesi

SHRP 1987 yılında 150.000.000,00 dolarlık toplam bütçesinin 50.000.000,00 dolarını asfalt kaplamaların performansını geliştirmek amacı için kullanmıştır. Bu amaçla ortaya çıkarılan ve günümüzde halen geliştirilmekte olan Superpave yönteminde kullanılan yağurmalı pres cihazının tarihteki ilk örneği 1930’lu yıllarda Teksas Karayolları (Texas Highway Department) tarafından imal edilmiştir (Şekil 3.4). 1950’li yılların sonu ve 1960’lı yılların başında manuel sıkıştırma işlemini

temsil eden mekanik sıkıştırmaya geçilmiştir. Bu işlem günümüzde de devam etmektedir (Huber, 1996).



şekil 3.4 Teksas Karayolları tarafından imal edilen ilk yoğurmalı pres (www.fhwa.dot.gov, 2014)

Superpave yöntemi, A.B.D.'de yüksek sıcaklıklar ve ağır taşıt yükleri için Marshall yönteminin geliştirilmesi ile oluşturulan karışım tasarım yöntemidir (Nelson, 2005). Ayrıca, Marshall tasarım yönteminden farklı olarak agrega ve bitüm seçiminde uygulanacak bölgenin trafik yükü ve sıcaklık değerlerine de bakılır (Keskin, 2011).

3.3.2 Superpave Karışım Tasarım Yöntemi

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

3.3.2.1 Agrega Seçimi

Superpave tasarım yöntemini Marshall yöntemi arasındaki en belirgin farklılıklardan birisi de 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 (Superpave Mix Design,2001). Bunlar:

- Kaba agrega köşeliliği (ASTM D5821-13):

Superpave tasarım yönteminde kırılmış yüzeye sahip agrega kullanımı tavsiye edilmektedir (Topal, 2008). Köşelilik, agregaların yüksek iç sürtünmelere sahip olarak kayma gerilmelerine karşı yeterli dayanıklılığı sağlamasına yardımcı olur. Böylece, asfalt kaplama tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağlar (Kennedy ve diğer., 1994; Topal, 2001; Topal ve Şengöz, 2005). ASTM D5821-13'e göre kaba agrega köşeliliği, “Boyutu 4,75mm ve daha büyük, köşeli yüzü bir ya da birden fazla olan agregaların ağırlıkça yüzdesi” olarak tanımlanmaktadır.

- İnce agrega köşeliliği (ASTM C1252-06):

Tasarımda kullanılacak ince agregalarda sıkışmamış boşluk oranını belirlenmesi gerekmektedir. Daha yüksek boşluk oranı, daha yüksek köşelilik olarak yorumlanır (Topal, 2008). Bu özellik ince agregaların iç sürtünmeleri ile tekerlek izi oluşumunu engellemektedir (Topal ve Şengöz, 2005). Bu test, 2,36- No.200 ile 4,75 mm -2,36 mm çaplı elekler arasında kalan agregalar üzerinde uygulanabilir.

- Uzun ve yassı parçacıklar (ASTM D4791-10):

Agrega karışımları içerisindeki uzun parçacıklar yol yapımı süresince ya da trafik yükleri altında kırılmaya yatkın oldukları için istenilmemektedir. Bu sebeple, uzun yüzeyinin kısa yüzeyine oranı beşten büyük olan agregaların ağırlıkça oranının

kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu test, 9,5mm elek üzerinde kalan agregalar üzerinde uygulanabilir (Harman ve diğer., 2002; Topal, 2008).

- Kil içeriği, Kum eşdeğerlik testi (ASTM D2419-09):

Kil içeriği agrega ve bitüm arasındaki adezyonu etkilediği için önemlidir. Bu sebeple, tasarım aşamasında 4,75 mm elekten geçen agregaların içerisinde bulunan kil miktarı hesaplanır.

Karışımda kullanılacak agrega karışımının mutabakat özellikleri şöyle hesaplanır:

$$X = \frac{x_1 P_1 p_1 + x_2 P_2 p_2 + x_3 P_3 p_3 + \dots}{P_1 p_1 + P_2 p_2 + \dots} \quad (3.10)$$

Burada:

X = Agrega karışımı için mutabakat değeri

x_i = i yığını için mutabakat testi sonuçları

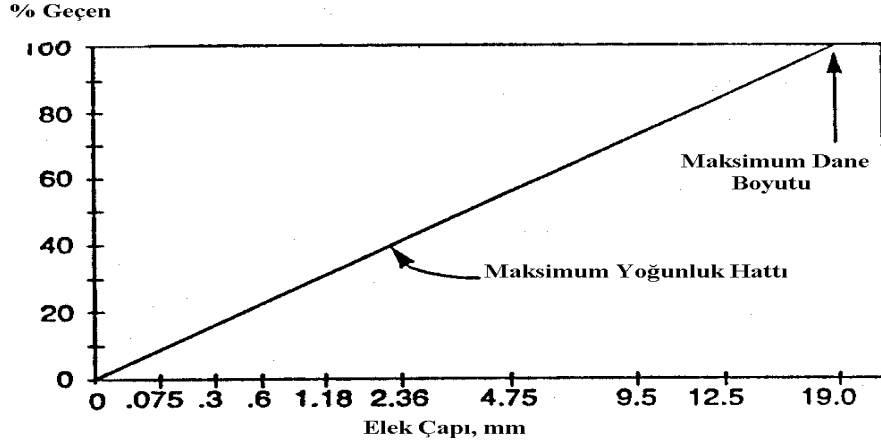
P_i = Karışımdaki i yığını oranı

p_i = Kullanılan test özelliğine göre elekler arasında kalan ya da geçen i yığını yüzdesi

Kullanılacak gradasyonun belirlenmesi için öncelikle elek analizi deneyi yapılır ve sonuçların şartname sınırları içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. Agrega gradasyonu, sertlik, stabilite, durabilite, permeabilite, işlenilebilirlik, yorulmaya karşı direnç, sürtünmeye karşı direnç ve sudan kaynaklı hasarlara karşı direnci etkilediği için son derece önemlidir (Roberts ve diğer., 1996). Superpave ve 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.

Gradasyon seçiminde, düşey ekseninde % geçen miktar yatay ekseninde ise, milimetre cinsinden elek çapları bulunan 0,45 üslü gradasyon grafiği

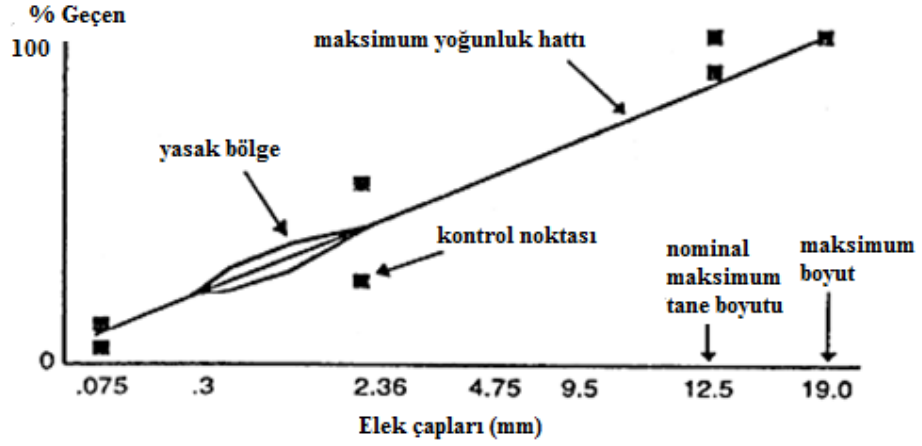
kullanılmaktadır (Şengöz, 1997). Grafiğin orijin noktası ve maksimum tane boyutunu birbirine bağlayan düz çizgi, yani; maksimum yoğunluk hattı tanelerin birbirine en fazla yaklaştığı hattır. Şekil 3.5.'de ilgili grafik verilmiştir.



Şekil 3.5 Maksimum dane boyutu için maksimum yoğunluk hattı (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Bu tasarım yönteminde dikkat çeken bir başka nokta ise, 0,45 üslü gradasyon grafiği ile agrega seçiminde dikkat edilmesi gereken kontrol noktaları ve yasak bölgedir. Gradasyonun kontrol noktaları arasından geçmesi fakat yasaklanmış bölgeden geçmemesi gerekmektedir (Keskin, 2011).

Kontrol noktaları, en küçük (0,075 mm), 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 (Asphalt Institute Superpave Series No:2, 1996). Şekil 3.6'de Superpave yönteminin gradasyon limitleri, kontrol noktaları ve yasak bölge gösterilmiştir. Tablo 3.4. ve 3.5.'de ise, nominal maksimum tane boyutuna göre kontrol noktaları ve yasak bölge limitleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Superpave gradasyon limitleri (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Tablo 3.4 Kontrol noktaları limit değerleri (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Nominal Max. Tane	ELEK ÇAPI	%GEÇEN (min)	%GEÇEN (max)
12,5 mm	0,075 mm	2	10
	2,36 mm	28	58
	12,5 mm	90	100
19 mm	0,075 mm	2	8
	2,36 mm	23	49
	19 mm	90	100
37,5 mm	0,075 mm	0	6
	2,36 mm	15	41
	37,5 mm	90	100

Tablo 3.5 Yasak bölge limit değerleri (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Nominal Max. Tane	ELEK ÇAPI	%GEÇEN (min)	%GEÇEN (max)
12,5 mm	2,36 mm	39,1	39,1
	1,18 mm	25,6	31,6
	0,6 mm	19,1	23,1
	0,3 mm	15,5	15,5
19 mm	2,36 mm	34,6	34,6
	1,18 mm	22,3	28,3
	0,6 mm	16,7	20,7
	0,3 mm	13,7	13,7
37,5 mm	2,36 mm	23,3	27,3
	1,18 mm	15,5	21,5
	0,6 mm	11,7	15,7
	0,3 mm	10	10

3.3.2.2 Bitüm Seçimi

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. Örneğin, PG 70-22 olarak adlandırılmış bitüm için, 70 projenin yapılacağı bölgedeki son 20 yıldaki en sıcak 7 gün için ortalama en yüksek sıcaklık derecesiyken -22 ise, kaplamanın yapılacağı yerdeki en soğuk günün sıcaklığıdır (Harman ve diğer., 2002). Kaplama sıcaklığının yanısıra, trafik hacmi ve trafik hızı da bitüm derecesini değiştirmektedir. Düşük trafik hacmi ve hızı bitüm sınıfı seçimin de önem arz etmektedir (Nallamothu, 2003).

3.3.2.3 Numunelerin Hazırlanması

Superpave yönteminde de diğer tasarım yöntemleri gibi farklı bitüm oranlarında karışımlar hazırlanır ve bu karışımların ayrı ayrı özellikleri değerlendirilerek optimum bitüm miktarı tayin edilir. Superpave yoğurmalı pres cihazı, karışımın gerçek sahadaki parçacık hareketlerini laboratuvar koşullarında temsil etmek amacıyla geliştirilmiştir (Roberts ve diğer., 1996). Her bir numune örneği 4 saat

karıştırma sıcaklığında bekletilerek kısa dönem yaşlanmaya maruz bırakılır ve ardından numuneye hidrolik ya da mekanik basınçla yük uygulayan yoğurmalı pres ile sıkıştırılır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları kullanılan bitümün özelliklerine göre değiştiği için, bitüm değişmediği sürece sıkıştırma aynı viskozite değerlerinde gerçekleşmektedir.

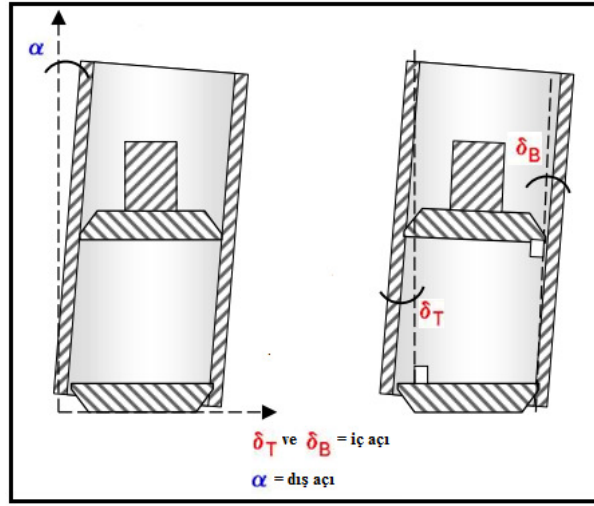
Superpave yoğurmalı presin en önemli amacı, karışım numunelerini gerçek kaplama sıcaklığı ve yükleme koşulları altında olan yoğunluklarda gerçeğe yakın olarak sıkıştırmaktır. Kalıbın yoğurma sayısı (jirasyonu), sıkışma sonundaki numune yüksekliği ve sıkışma basıncı önceden saptanabilmektedir. Yükleme mekanizması reaksiyon çerçevesine karşı basınç uygular ve numunede 600 kPa sıkıştırma basıncı üretecek bir yükü, yükleme kafasına uygular. Asfalt numuneleri 100 mm ya da 150 mm çapında kalıplar kullanılarak standartta belirtilen yoğurma açısı altında sıkıştırma süresince dakikada 30 sabit dönüş olacak şekilde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Şekil 3.7’de yoğurmalı pres cihazı ve sıkıştırma başlığı görülmektedir.



Şekil 3.7 Yoğurmalı pres cihazı ve sıkıştırma başlığı

Araştırmalar farklı yoğurmalı presler ile üretilen numunelerin hacimsel deney sonuçlarında farklılıklar olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalarda yoğurma açısından kaynaklanan bu varyasyonları yok etmek için tüm yoğurmalı preslerin aynı

yöntem ve aynı cihaz kullanılarak kalibre edilmesi gerektiği sonucu çıkartılmıştır (Prowell, Brown ve Huner, 2003). Kalıbın dış yüzü ile kompaktör çerçeve arasındaki açı “dış açı” kalibrasyonları üreticiden üreticiye değişkenlik gösterirken, FHWA’nın Quip Inc. İşbirliği ile geliştirdiği kalıbın iç yüzü ile alt plaka arasındaki açı olan “iç açı” ölçme sisteminde aynı metodoloji ve ekipmanlar kullanılarak kalibrasyon yapılmaktadır (DeVol, Krause, McLaughlin, Willoughby ve McLean, 2007). Dış açı, AASHTO T312 standartında $1,25\pm 0,02$ olarak, iç açı ise ASTM D6925-09 standartında $1,16\pm 0,02$ EN 12697-31 standartında ise $0,82\pm 0,02$ olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8’de yoğurmalı presin iç ve dış açıları gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yoğurmalı presin iç ve dış açıları

Sıkıştırma işlemi girilen devir sayısı tamamlanıncaya kadar sürer. Tablo 3.6.ve 3.7.’de de gösterildiği gibi Superpave karışım tasarımı yönteminin, yolun trafik hacmine göre üç farklı devir sayısı vardır:

Tablo 3.6 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 *Rekreasyon alanlarına hizmet veren özel amaçlı yollar da geçerli olabilir.
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 tamamiyle 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

Tablo 3.7 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

1. 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 (Keskin, 2011).

2. 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 (Buchanan ve Brown, 2001).
3. 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 buna bağlı olarak 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).

Gerçekte trafik yükleri ve sıcaklık koşullarına dayanan 28 farklı N_{des} değeri vardır (Anderson, Turner, Peterson ve Mallick, 2002). Ancak, uygulamada 50, 75, 100 ve 125 olmak üzere dört farklı N_{des} değeri kullanılmaktadır. Bu dört farklı değer, sıcaklıktan bağımsız olarak trafik değerinin düşük ya da yüksek olmasına göre değişmektedir. N_{des} değeri ise, kaplamanın yapılacağı bölgenin en yüksek 7 gün sıcaklığına ve ESALs cinsinden trafik yüküne göre değişmektedir. N_{max} ve N_{ilk} değerleri N_{des} 'in birer fonksiyonudur:

$$N_{ilk} = (N_{des.})^{0.45} \quad (3.11)$$

$$N_{max} = (N_{des.})^{1.10} \quad (3.12)$$

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:

$$G_{mb, N_{ilk}} = \frac{h_d}{h_i} (G_{mb, N_{des}}) \quad (3.13)$$

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:

$$\%G_{mm, N_{ilk}} = 100 \frac{G_{mb, N_{ilk}}}{G_{mm}}$$

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.

$$P_{b,est} = P_{br} - (0,4 \times (4 - V_a @ N_{des})) \quad (3.14)$$

$$VMA_{est} = VMA @ N_{des} + C \times (4 - V_a @ N_{des}) \quad (3.15)$$

$$VFA_{est} = \frac{100(VMA_{est} - V_a @ N_{des})}{VMA_{est}} \quad (3.16)$$

$$Est\%G_{mm,ilk} = \% G_{mm,ilk} - (4,0 - V_a @ N_{des}) \quad (3.17)$$

$$Est\%G_{mm,m} = \% G_{mm,m} - (4,0 - V_a @ N_{des}) \quad (3.18)$$

Burada:

$P_{b,est}$ = Tahmin edilen bitüm içeriği

P_{bt} = Bitüm içeriğinin deneme yüzdesi

$V_a = N_{des}$ 'daki toplam karışımdaki 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

Ayrıca kullanılan bitüm oranı için filler miktarı da şu şekilde hesaplanır:

$$P_{be,est} = (P_s \times G_b) \times \frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{se} G_{sb})} \times P_{b,est} \quad (3.19)$$

$$F/P_{be,est} = \frac{\% P_{0,075 mm}}{P_{be,est}} \quad (3.20)$$

Burada:

$F/P_{be,est}$ = Efektif bitüm oranı için tahmin edilen ince agrega miktarı

$\%P_{0,0075mm} = 0,075mm$ 'den küçük boyutlu malzeme yüzdesi

Superpave karışım yönteminde tasarım için kullanılan yukarıda bahsedilen parametrelerin belirli kriterleri vardır. Tablo 3.8.'de bahsedilen şartname sınırları yer almaktadır.

Tablo 3.8 Superpave Karışım Tasarımı Kriterleri

Tasarım Hava boşluğu		%4				
Filler/ bitüm oranı		0,6-1,2*				
Çekme gerilmesi dayanımı		Min. %80				
Mineral agregata içerisindeki boşluk yüzdesi (VMA)	Nominal maksimum agregata 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 yüzdesi			Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi (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 (KTŞ, 2013)

3.3.2.4 Optimum bitüm miktarı tayini (ASTM D3387-11)

Kullanılacak agregaların yapısının belirlenmesi, bitüm özelliklerinin tespit edilmesinin ardından belirli oranlarda bitüm içerikli asfalt numuneleri Superpave yöntemi ile hazırlanır. Aşağıda bu bitüm içerikleri verilmiştir:

- $P_{b,est} - \%0,5$
- $P_{b,est}$
- $P_{b,est} + \%0,5$
- $P_{b,est} + \%1,0$

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 yoğurma sayısındaki %4 hava boşluğuna denk gelen bitüm

miktarı diğer Superpave sınır koşullarının da sağlanması şartıyla optimum bitüm miktarı olarak kabul edilir.

Kaplamanın servis ömrü sonunda trafik yükünden dolayı sıkışacağı miktarı ve sahip olacağı hacimsel özellikleri öğrenebilmek amacıyla herbir asfalt yüzdesi için, ikişer numune N_{max} 'a kadar sıkıştırılır. Bu sıkıştırma sayısındaki numunenin sahip olduğu özelliklerde Superpave sınır koşulları ile kıyaslanmalı ve değerler şartnameye uygun olmalıdır.

Son olarak, numunelerin nem hassasiyetleri incelenir. Tasarım agrega yapısındaki, optimum bitüm içerikli altı numune ve koşullandırılmış üç numune hazırlanır. Bütün numunelerin çekme direnci hesaplanır ve koşullandırılmış numunelerin ortalama çekme gerilmesi ile koşullandırılmamış numunelerin ortalama çekme gerilmesine oranı bulunarak Superpave kriterleri ile karşılaştırılır.

BÖLÜM DÖRT

ILIK KARIŞIM ASFALT TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde IKA teknolojisi ile ilgili literatür araştırmalarından elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

4.1 IKA Tarihçesi

Son yıllarda artan çevre bilinci ile doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu, sera gazlarını azaltmak gibi avantajlar asfalt teknolojisinin çevre dostu ılık karışım asfaltlara ilgisini arttırmıştır. IKA teknolojisi adını, 1997 yılında Avrupa'da Sasol Wax International AG firmasının bu tez çalışması kapsamında da kullanılan tamamen organik olan Sasobit® katkısını üretmesiyle duyurmuştur (Button, Estakhri, ve Wimsatt, 2007). IKA teknolojisi, bitümün viskozitesini düşürüp işlenebilirliği arttırarak BSK'ye göre daha düşük sıcaklıklarda karıştırma, taşınma ve kaplama işleminin gerçekleşmesini sağlar (Chowdhury ve Button, 2008).

Ilık karışım asfalt üzerine yapılan ilk çalışmalara 1956 yılında Iowa Üniversitesi'nde rastlanmaktadır (Sargand, Figueroa, Edwards ve Al-Rawashdeh, 2009). Bir sonraki önemli çalışmayı ise 1970 yılında Chevron yapmıştır ve geliştirdiği yöntemler sayesinde asfalt emülsiyonları ile hazırlanan bitümlü karışımlara ait tasarım ve üretim işlerinde uyulması gereken bazı önemli kuralları belirlemiştir (Chevron,1977). Daha sonraki senelerde bu uygulamanın devamı niteliği taşıyan çalışmalarda ise emülsiyon kullanılarak hazırlanan asfalt karışımının daha düşük sıcaklıklarda da hazırlanabildiği ve böylelikle taşıma maliyetlerinin de daha düşük olduğu vurgulanmıştır (Kuennen, 2004).

Araştırmacılar, IKA teknolojisini geliştirirlerken karıştırma, serme ve sıkıştırma aşamasında sıcaklığın etkisini araştırmaya başlamıştır (Porter, 2011). Sonuç olarak, karıştırma ve yerleştirme sıcaklıklarının azalması IKA kavramının ve teknolojilerinin geliştirilmesini tetiklemiştir (Croteau ve Tessier, 2008). İlk araştırma raporlarının Avrupada 90'lı yıllarda gelmesinin ardından ABD'de kamuya açık raporlarla sunulan

bir çok test ve saha denemeleri yapılmıştır (Zaumanis, 2010). Böylelikle, üretici firmalar ile akedemisyenlerin fikir alışverişi yapabileceği platform oluşturulmuştur. Bu durum, takip eden süreçte, Shell Bitüm Firması'nın, Norveç, İngiltere ve Hollanda'da IKA ile deneme yolları ve laboratuvar deneyleri yapabilmesine vesile olmuştur (Koenders ve diğer., 2000).

IKA teknolojisi günden güne gelişmeye devam etmesine rağmen hala günümüzde BSK kadar sık kullanılmamaktadır. Dünyada IKA katkıları ile hazırlanan bitüm kaplamaları üzerinde laboratuvar ve saha çalışmaları yapılmakta ve bu teknolojinin avantaj ve dezavantajları araştırılmaktadır (Zettler, 2006).

4.2 IKA Avantajları

Araştırmalar, IKA teknolojisinin, asfalt endüstrisi ürün performansı, inşaat verimliliği ve çevre yöntemini geliştirmek için güzel bir şans olduğunu göstermektedir (Şengöz, Topal ve Gorkem, 2013a). IKA katkıları başta bitümün viskozitesini düşürmek olmak üzere çok çeşitli faydalar sağlamaktadır. Düşen viskozite değeri, işlenebilirliği artırırken uygulama kolaylığı ve ekolojik faydalar gibi avantajları da beraberinde getirmektedir (Hurley ve Prowell, 2006a). Düşük üretim sıcaklıkları asfalt kaplamaların en önemli özelliklerinden biri olan durabiliteyi arttırmaktadır (Zeleeuw, Paugh, Corrigan, Belagutti, ve Ramakrishnareddy, 2013). Ayrıca, IKA katkıları kullanımı sıcaklık duyarlılığını azaltarak düşük sıcaklık çatlakları, yumuşama noktasını arttırarak da tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara karşı direnci arttırmaktadır (Şengöz ve Işıkyakar, 2008). Bu bölümde bu avantajlardan bahsedilecektir.

4.2.1 Uygulama Kolaylığı

Daha önceden de bahsedildiği gibi, IKA'ların BSK'lara göre en belirgin farklılığı daha düşük viskozite değeridir. Viskozite değerindeki bu düşüş sayesinde agregalar bitümle daha kolay kaplanabilir ve böylelikle işlenebilirlik de artış meydana gelir (Bennert, Reinke, Mogawer ve Mooney, 2010). Karıştırma işlemi süresince düşük

viskozite daha kolay karıştırma demektir (Croteau ve Tessier, 2008). Bununla birlikte IKA'lardaki düşük viskoziteden ötürü BSK'lara oranla daha az güç gerekmektedir (Kristjansdottr, Muench, Michael ve Burke, 2007; Rubio, Martinez, Baena ve Moreno, 2012).

Plentten alınan BSK'lar nakliye sırasında soğumakta ve serim alanına geldiklerinde uygulama sıcaklığının çok altında olduklarından ötürü gerekli boşluğu elde edememektedirler. Ancak, IKA'ların düşük sıkıştırma sıcaklıklarına sahip olmaları bu problemi en az seviyeye indirmektedir (Croteau ve Tessier, 2008). Ayrıca, yapılan çalışmalar sonucunda, IKA'ların uzun mesafelerdeki uygulama alanlarına taşınmaları sırasında gerekli işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirliği daha kolay muhafaza ettiği görülmüştür (D'Angelo ve diğer., 2008).

4.2.2 Çevresel Faydalar

Artan küresel ısınma ve azalan yeşil alanlar toplumları çevre dostu teknolojilere yönlendirmiştir. BSK üretimindeki çevresel anlamda karşılaşılan en önemli sorun serme ve sıkıştırma sırasında doğaya salınan emisyonlardır. Azalan serme ve sıkıştırma sıcaklıkları istenmeyen bu gazların meydana çıkmasını da önemli oranda azaltmaktadır (D'Angelo ve diğer., 2008). Böylece, asfalt üretiminde çalışan işçilerin daha düşük sıcaklıklarla çalışması sağlanarak sağlığa zararlı gazları soluma riski minimuma indirgenmektedir (European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2010). Tablo 4.1. Gandhi tarafından yapılan çalışmalar sonucunda IKA üretimindeki azalan emisyon miktarlarını göstermektedir (Gandhi, 2008).

Tablo 4.1 IKA üretimi süresince emisyon emilimi

	Sasobit®	Aspha-min®	Evotherm®	WAM-Foam®
Sülfürdioksit	X	%17,60	%81	X
Karbondioksit	%18	%3,20	%46	%31
Karbonmonoksit	X	X	%63	%29
Nitrojenoksit	%34	%6,10	%58	%62
Toplam partikül madde	X	%35,30	X	X
Uçucu organik bileşikler	%8	X	%25	X

2004 yılında Norveç'te yapılan başka bir çalışmada ise Larsen ve arkadaşları asfalt plentlerinde üretilen IKA'ların BSK'lara göre avantajlarını şu şekilde özetlemiştir.

- % 40 yakıt tasarrufu,
- Karbon dioksit (CO₂) salımında % 31 oranında azalma,
- Karbon monoksit (CO) salımında % 29 oranında azalma,
- NO_x salımında ise % 62 oranında bir azalma (Larsen, Moen, Robertus. ve Koenders, 2004).

Büyük bir çevresel sıkıntı olan atıl haldeki kullanılmış asfaltların IKA ile kullanımıyla ilgili çok çeşitli araştırmalar mevcuttur. Bu çalışmalara göre, IKA uygulamalarında kullanılan optimum bitüm miktarı BSK'ya oranla daha fazladır. (Valdés, Pérez-Jiménez, Miró, Martínez ve Botella, 2011). Böylece, geri kazanılmış asfaltların yeniden yol inşasında kullanılması ile sürdürülebilirlik sağlanarak doğal kaynak korunmasına fayda sağlanmaktadır (Oylumluoglu, 2012).

4.2.3 Ekonomik Faydalar

Daha önceden de bahsedildiği gibi, IKA uygulama sıcaklığı BSK'ye oranla daha düşüktür. Sonuç olarak, bu teknolojinin yakıt tüketimi geleneksel BSK ile kıyaslandığında oldukça azdır. Düşük sıcaklıklar düşük enerji tüketimi demektir ve IKA üretimi için harcanan enerji BSK üretiminde harcanan enerjinin yüzde 60-80'i olarak rapor edilmiştir (Rubio ve diğer., 2012). Böylece, ton başına yaklaşık 4\$'lık bir tasarruf elde edilmektedir (McKenzie, 2006). Diğer çalışmalar ise, IKA teknoloji ile %20-35 yakıt tasarrufu sağlandığını göstermiştir (D'Angelo ve diğer., 2008). Ayrıca bazı alan uygulamalarında, üretim sıcaklığındaki 17°C'lik azalmaya bağlı olarak yakıt tüketiminde %10-30 arasında azalma olduğu rapor edilmiştir (The Asphalt Pavement Association of Oregon, 2003). Böylece, yakıt tüketiminden sağlanacak tasarruf oranının üretim sıcaklığının düşürüldüğü sıcaklık değeri ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir.

4.3 IKA Dezavantajları

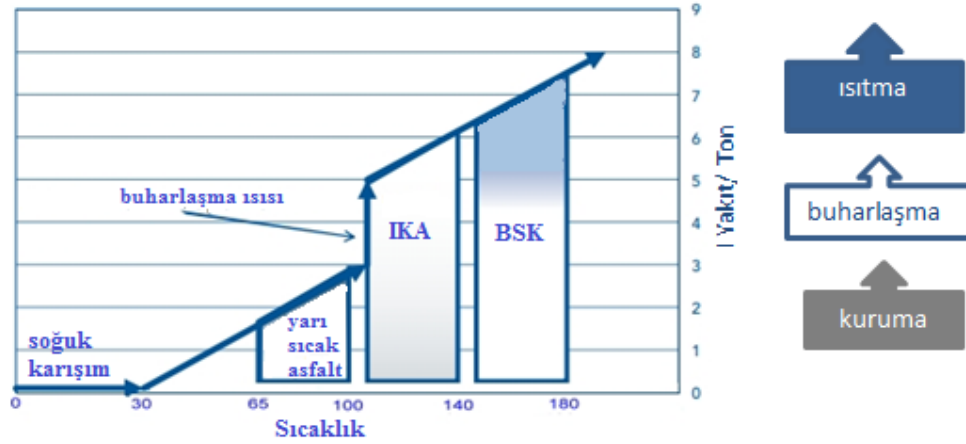
Tüm avantajlarına rağmen, diğer yeni teknolojiler gibi IKA teknolojisinin de olası sakıncaları olabilir (Vaitkus, Cygas, Laurinavicius ve Perveneckas, 2009). Akla gelebilecek ilk sorun, IKA teknolojisinin nispeten yeni bir teknoloji olmasından dolayı problemleri için uzun vadeli bir değerlendirme yapılamamış olmasıdır. Bir başka problem ise, IKA karışımlarının performans özellikleri ile ilgilidir. IKA teknolojilerinden bazıları IKA yolları için istenilen mukavemeti sağlayamamaktadır.

Diğer bir taraftan IKA uygulamalarında sorun yaratabilecek neme hassasiyet, asfalt kaplamanın önemli bir performans özelliğidir (Şengöz ve diğer., 2013a). IKA BSK gibi yüksek sıcaklıklara kadar yüksek sıcaklıklarda üretilmediği için agregalar karışım öncesinde tamamen kurumayabilir (Dasa, Tasdemir ve Birgissona, 2012; Kvasnak ve diğer., 2009). Bazı durumlarda yeterince ısınmadan karışımda kullanılan agregaların yüzeyi ile bitüm arasında oluşan yetersiz kohezyon soyulmaya neden olmaktadır (Hurley ve Prowell, 2006a). Fakat son yıllarda soyulma karşıtı katkı

maddeleri üretilmiş ve bu probleme de çözüm sağlanmıştır (Xiao ve Amirkhanian, 2010).

4.4 IKA Teknolojisi ve Üretim Sınıflandırılması

Başlıca amacı viskoziteyi azaltmak olan IKA teknolojileri çeşitli katkı maddeleri ve teknikler olarak kategorize edilebilmektedir. Bazı sınıflandırmalar üretim sıcaklığına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalara göre, üretim sıcaklığı 0-30°C arası olanlar soğuk karışım, 65-100°C arası olanlar yarı ılık karışım asfalt, 110-140°C arası olanlar ılık karışım ve son olarak üretim sıcaklığı 140-180°C olanlar ise sıcak karışım asfaltlar olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 4.1. üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırılan karışımları göstermektedir (D'Angelo ve diğer., 2008).



Şekil 4.1 Sıcaklıklara göre sınıflandırma (D'Angelo ve diğer., 2008) (Yakıt kullanımı ve sıcaklıklar yaklaşık değerlerdir.)

Diğer bir sınıflandırma yöntemi ise, üretim metodlarının kıyaslanmasıyla elde edilmektedir ve üç ana gruptan oluşmaktadır. Bunlar;

- Organik katkıları (Fischer-Tropsch mumları, yağlı asit amidleri ve Montan mumları)
- Kimyasal katkıları (Emülsifikasyon katkıları veya polimerler)
- Köpüklendirme yöntemleri (Su içeren katkıları ve direkt su enjeksiyonu)

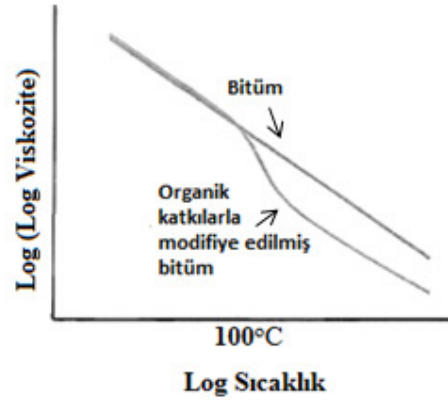
Tablo 4.2 İKA teknolojisini ve kullanıldığı ülkeleri özetleyen bir tablo yer almaktadır (Middleton ve Forfylow, 2008).

Tablo 4.2 İKA teknolojisine genel bakış (Middleton ve Forfylow, 2008)

İKA İşlemi	Şirket	Katkı	Üretim Sıcaklığı (°C)	Kullanan Ülkeler
Sasobit®	Sasol	Evet	BSK'dan 30°C'ye kadar daha düşük	Almanya ve dünya çapındaki 20 başka ülkede daha
Advera® (Sentetik Zeolit)	Eurovia, PQ Corporation	Evet	BSK'dan 30°C'ye kadar daha düşük	Fransa, Almanya, Birleşmiş Milletler
WAM-Foam®	Kolo Veidekke, Shell Bitüm	Yumuşak sınıf asfalt binder	110-120°C	Fransa, Norveç, İngiltere, Kanada, İtalya, Hollanda, İsveç
Evotherm®	MeadWestvaco	Evet	85-115°C	Fransa, Kanada, Çin, Güney Afrika, Birleşmiş Milletler

4.4.1 Organik katkılar

Organik katkılar bitüm içinde çözülebilen parafın içermektedirler. Böylelikle artan sıcaklık ile eridiklerinde eklendikleri bitümün viskozitesini düşürmektedirler (Rubio ve diğer., 2012). Organik katkı modifiyeli bitümün viskozitesindeki düşüş miktarının sıcaklık ile olan ilişkisi Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.2 Organik IKA katkılı bitümün sıcaklık- viskozite ilişkisi

C_nH_{2n+2} genel yapıları hidrokarbon zincirleri parafin olarak adlandırılırlar ve erime noktaları katkı çeşidine göre 80-120°C arasında değişmektedir (Bueche, 2009). Karbon atomu sayısı (n) 20'den büyük olan zincirler oda sıcaklıklarında katı halde bulunmaktadır (Freund ve Mózes, 1982). Parafinin uzun zincirli alifatik hidrokarbon yapısı bitüm özelliklerinde olağanüstü bir değişikliğe neden olmaz (Sasol wax, 2014).

Organik IKA katkıları 1980'li yıllardan bu yana kullanılmaktadır ve üretiminin üç farklı yöntemi bulunmaktadır:

- (i) Fischer-Tropsch mumları,
- (ii) Yağlı asit amidleri,
- (iii) Montan mumları.

Sasobit[®], en yaygın kullanılan organik IKA katkısıdır ve Fischer-Tropsch yöntemi ile üretilir (Sasol wax, 2014). Beşinci bölümde daha detaylı anlatılan Sasobit[®] uzun alifatik karbon zincirine sahiptir ve erime noktası yaklaşık olarak 100°C civarındadır.

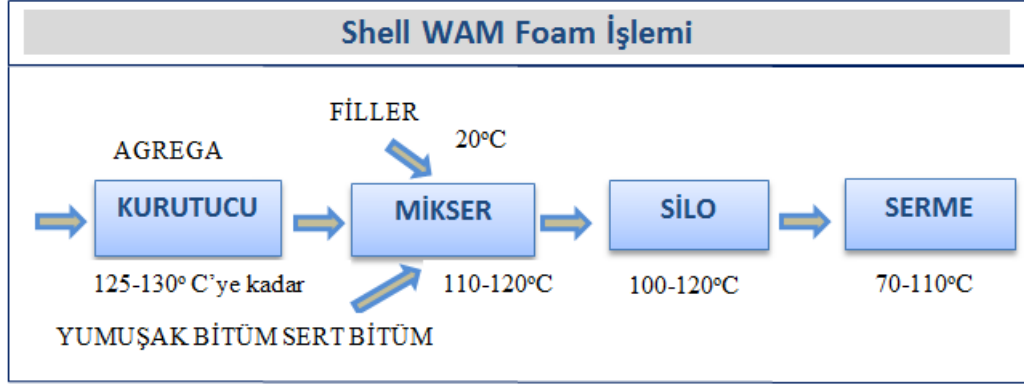
Tablo 4.3'de diğer Organik IKA katkıları hakkında bilgi verilmektedir (D'Angelo ve diğer., 2008).

Tablo 4.3 Organik IKA katkı çeşitleri (D'Angelo ve diğer., 2008)

Katkı	Şirket	Üretim Sıcaklığı (plentteki) °C	Çalışıldığı ülkeler
Sasobit® Fischer-Tropsch wax	Sasol	BSK'dan 20-30°C daha düşük 130°C-170°C (Alman standartlarının önerisi)	Almanya ve dünya çağındaki 20 başka ülkede daha
Asphaltan-B (Montan Wax)	Romonta	BSK'dan 20-30°C daha düşük 130°C-170°C (Alman standartlarının önerisi)	Almanya
Licomont BS 100 (katkı) ya da Sübit (binder) (yağlı asit amidler)	Clariant	BSK'dan 20-30°C daha düşük 130°C-170°C (Alman standartlarının önerisi)	Almanya
3E LT ya da Ecoflex (tescilli)	Colas	BSK'dan 30-40°C daha düşük	Fransa

4.4.2 Köpüklendirme Yöntemleri

Su, bitüm kaplama potansiyelini artırmada önemli bir faktördür. Buna dayanarak, köpüklendirme teknikleri iki şekilde geliştirilmiştir. Birincisi, karışım sırasında küçük su parçacıklarını karışıma enjekte edilmesidir. Bu yöntemde, su parçacıkları buharlaşması için sıcak bitüme doğrudan püskürtülür (Larsen, 2001). Bu, su hacminin 1,673 katına çıkmasına sebep olur (Cengel ve Boles, 2008). WAM-foam, Shell Global Solutions ve Kolo Veidekke işbirliği ile bu teorinin temelinde geliştirilen patentli köpük teknolojisidir. WAM-foam teknolojisinde, agregalar öncelikle yumuşak bitüm ile karıştırılır. Ardından, karışıma ıslak filler ile köpüklendirilmiş sert bitüm eklenir. Bu işlem uygulama sıcaklıkları ile Şekil 4.2'de gösterilmiştir (Shell Bitumen, 2011).



Şekil 4.3 WAM-foam yöntemi (Shell Bitumen, 2011)

Karışımında köpüklendirme sağlamanın diğer yolu ise, bitüme yüksek su tutma kabiliyetindeki katkıları (sentetik zeolit (Advera®) ve doğal zeolit) eklemektir. Sıcaklık sebebiyle katkı içerisindeki su buharlaşır ve kısa süreli hacim artışı ile birlikte viskozitenin düşmesi sağlanır. Böylelikle, işlenebilirlik artar ve agregaların bitüm ile kaplanma kabiliyetinde artış gözlenir (Butz, Rahimian ve Hildebrand, 2001). Köpüklendirme tekniği ile yapılan diğer çalışmalar Tablo 4.4.'de verilmiştir (D'Angelo ve diğer., 2008).

Tablo 4.4 IKA köpükendirme teknolojisinin başlıca çalışmaları (D'Angelo ve diğer., 2008)

Teknoloji	Şirket	Üretim Sıcaklığı (plentteki) °C	Çalışıldığı ülkeler
WAM- Foam	Shell Global Solution ve Kolo Veidekke	110-120°C	Birçok Avrupa ülkesi ve Kanada
Advera® (Sentetik Zeolit)	PQ Corporation	BSK'dan 30°C'ye kadar daha düşük 130-170 °C (Alman standartlarının önerisi)	Birleşmiş Milletler
Aspha- min® (Sentetik Zeolit)	Eurovia ve MHI	BSK'dan 30°C'ye kadar daha düşük 130-170 °C (Alman standartlarının önerisi)	Almanya
LT Asfalt	Nynas	90°C	Hollanda ve İtalya
Double- Barrel Green	Astec	116-135 °C	Birleşmiş Milletler
ECOMAC	Screg	45°C' de koyulur	Fransa
LEA, EBE ve EBT	LEACO, Fairco ve EIFFAGE Travaux İdaresi	<100°C	Fransa, İspanya, İtalya ve Birleşmiş Milletler
LEAB®	BAM	90°C	Hollanda

Ülkemizde ise, Dokuz Eylül Üniversitesi'nde yürütülen 110M567 No'lu Tübitak projesi kapsamında doğal zeolitın IKA katkısı olarak kullanımı araştırılmıştır. Yapılan kapsamlı araştırmalar sonucunda bitümün %5'i oranında eklenen doğal zeolit katkılı IKA'ların üretim sıcaklığı 148-153 °C olarak belirlenmiştir (Sengöz, Topal ve Görkem, 2013b).

4.4.3 Kimyasal Katkılar

Bu katkı türlerinin de amacı diğerleri gibi, bitümü kimyasal olarak geliştirip bitüm performansını geliştirmektir. Anti-stripping maddeleri gibi yüzey aktif maddeler, kimyasal katkı maddelerinin bazı bileşimlerinden oluşmaktadır. Kimyasal IKA katkıları direkt olarak bitüme ilave edilmekte ve daha sonra bu karışım agrega ile karıştırılmaktadır. Kimyasal katkıları ile sıcaklık düşüşü su eklemeyen elde edilmektedir.

Akzo Nobel tarafından üretilen Rediset® bu katkıları örnek olarak gösterilebilir. Rediset®, organik katkı ve katyonik yüzey katkı maddelerinin kombinasyonundan oluşmaktadır (Chowdhury ve Button, 2008). Yüzey aktif maddeleri "aktif adhezyon" ile agreganın bitüm ile kolay kaplanma yeteneğini artırır, diğer bileşenler ise bitümün viskozitesini düşürmekte rol oynamaktadırlar (Prowell ve Hurley, 2007). Rediset® ile ilgili daha detaylı bilgilere "Deneysel Çalışmalar" bölümünde yer verilmiştir.

Başka bir kimyasal katkı çeşidi ise, Evotherm™ 'dir. Evotherm™ işlenebilirliği, adhezyon kuvvetini ve emülsiyon maddelerini geliştirmek için kullanılan kimyasal sıvı emülgatördür (Hurley ve Prowell, 2006b). MeadWestvaco Corporation tarafından yayınlanan bilgilendirme kataloğunda, bu katkıının üretim sıcaklığında 55°C'lik bir azalma sağladığı görülmektedir.

Diğer kimyasal katkı maddeleri kısaca Tablo 4.5.'de verilmiştir (Chowdhury ve Button, 2008; D'Angelo ve diğer., 2008; Prowell ve Hurley, 2007; Rubio ve diğer., 2012)

Tablo 4.5 Kimyasal Katkılar (Chowdhury ve Button, 2008; D'Angelo ve diğer., 2008; Prowell ve Hurley, 2007; Rubio ve diğer., 2012)

Teknoloji	Şirket	Üretim Sıcaklığı (plentteki) °C	Çalışıldığı ülkeler
Rediset® WMX	AkzoNobel Corporate	BSK'dan 10-15°C daha düşük	Birleşmiş Milletler.
Evotherm™	MeadWestvaco	85-115 °C	Fransa, Kanada, Çin, Güney Afrika ve Birleşmiş Milletler
Revix™	Mathy Teknoloji ve Mühendislik Hizmetleri, Inc. Ve Paragon Teknik Hizmetleri, Inc.	BSK'dan 15-25°C daha düşük	Birleşmiş Milletler
Cecabase RT	CECA	BSK'dan 30°C daha düşük	Amerika Birleşik Devletleri, Fransa
Iterlow T	IterChimica	120 °C	İtalya

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar anlatılmış ve sonuçları yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, saf ve IKA katkıli bitümler kullanılarak Marshall ve Superpave yöntemleri ile üretilecek asfalt kaplamalar için optimum bitüm oranları belirlenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır.

5.1 Malzemeler

Öncelikle çalışmada kullanılan bitüm, agrega ve IKA katkıları; Sasobit® (organik katkı), Rediset® (kimyasal katkı), Advera® (sentetik zeolit) ve doğal zeolitin genel özellikleri verilmiştir. Daha sonra, saf ve katkıli bitümler üzerinde geleneksel bitüm deneyleri uygulanarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.1.1 Bitüm

Deneysel 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. Deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Saf bitüm için laboratuvar test sonuçları

DENEY	ASTM STANDARTI TS EN STANDARTI	SONUÇLAR	ASTM LİMİTİ TS EN LİMİTİ
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	-
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (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	-
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT) Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36/D36M-12 TS EN 1427	54	48 (min)
Düktilite (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)

5.1.2 Agregalar

İKA katkıları kullanılarak hazırlanacak olan karışımlarda kullanılmak üzere agrega malzemesi kabası bazalt, incisi 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 Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Deneylerde kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Test	ASTM STANDARTI TS EN STANDARTI	Sonuçlar		ASTM LİMİTİ TS EN LİMİTİ
		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 Özgül Ağırlığı	ASTM C128-12			
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 Agrega Köşeliliği	ASTM C1252-06	47,85	58,1	min. 40

Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan agregaların hem ASTM hem de TS EN standartlarına göre kriterleri sağladığı görülmüştür.

Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için Tip-1 gradasyon sınıfının kullanımı uygun görülmüştür. Bu doğrultuda deneylerde kullanılacak agregalara

ASTM C136-06 standardında belirtilen koşullarda elek analizi yapılmış ve Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri için ayrı ayrı gradasyon sonuçları şartname sınır değerleri ile beraber Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 Kullanılan agrega gradasyonu

Test	19- 12,5 mm (Bazalt)	12,5-5 mm (Bazalt)	5-0 mm (Kalker)	Karışım Gradasyonu	Şartname	Şartname Limitleri
Karışım Oranı (%)	15	45	40			
Elek numarası Elek çapı (mm)					ASTM C136-06	
3/4" (19 mm)	100	100	100	100		100
1/2" (12,5 mm)	35,7	100	100	90,5		88-100
3/8" (9,5 mm)	2,5	89	100	80,5		72-90
No 4 (4,75 mm)	0,4	16	100	47,3		42-52
No 10 (2,00 mm)	0,3	1,2	81	33		25-35
No 40 (0,425 mm)	0,2	0,7	33	13,5		10-20
No 80 (0,180 mm)	0,15	0,4	22	9		7-14
No 200 (0,075 mm)	0,10	0,2	13	5,3		3-8

5.1.3 Ilık Karışım Asfalt Katkıları

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, IKA üretmek için üç çeşit IKA katkısı ve bunlara alternatif olabileceği düşünülen doğal zeolit kullanılmıştır. Kullanılan herbir katkıının kendine has özellikleri bulunmaktadır. Bunlardan, Sasobit® organik, Rediset® WMX ise kimyasal IKA katkılarındandır. Ayrıca, köpüklendirme teknikleri içerisinde yer alan Advera® katkısı (sentetik zeolit) ve doğal zeolit ılık karışım asfalt üretmek amacı ile kullanılmıştır.

5.1.3.1 Sasobit®

Sasol Wax (Güney Afrika) tarafından, Fischer-Tropsch (FT) yöntemi ile üretilen alifatik hidrokarbondur. Fischer-Tropsch yöntemi ile kömürün karbonizasyonu sırasında elde edilen Sasobit içerisinde 40 ila 115'den daha fazla karbon atomu bulunduğu için uzun-zincir alifatik hidrokarbon olarak tanımlanır. Buna karşın normal alifatik hidrokarbon molekülünde 22-45 adet karbon molekülü bulunur (Estakhri, Button ve Alvarez, 2010). Sasobit®'teki bu özellik erime noktasının FT mumlarına göre daha düşük olmasına neden olmuştur.

Üretici firma Sasol Wax'a göre erime noktası 98°C olan Sasobit®, 115°C sıcaklıktaki bitümün içerisinde tamamen çözünebilmektedir (Walker, 2009).

Sasobit® karışıma eklendiği zaman homojen bir dağılım elde edilmediği gerekçesiyle bitüme eklenerek kullanılmaktadır (Estakhri ve diğer., 2010). Uzun zincirli molekül yapısı, karıştırıldığı bitümün özelliklerinde gelişme yaratır. Bitüm içine karıştırıldığında eriyen Sasobit®, bitümün viskozitesini düşürüp, daha akıcı olmasını sağlar (Damm, Abraham, Butz, Hildebrand ve Riebeschl, 2002). Erime noktasının altındaki sıcaklıklarda kafes bir yapı oluşturan FT mum kristalize olur böylelikle karışımın stabilitesini artırır. Yapılan çalışmalarda Sasobit®'in yol trafiğe açıldıktan sonra kaplamada meydana gelen tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı saptanmış, sıkıştırmayı kolaylaştırdığı tespit edilmiştir (Hurley ve Prowell, 2005).

Üretici firma viskozitede istenilen düşüşü elde etmek için karışım ağırlığının %3'ü kadar katkının bitüme eklenmesini, düşük sıcaklık özelliklerinin olası etkisinden dolayı %4'ten çok ilave yapılmamasını önermektedir (Kanitpong, Nam, Martono ve Bahia, 2008). Yapılan çalışmalara göre, laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalarda Sasobit® ve bitüm yüksek kesmeli karıştırıcıya (high shear mixer) ihtiyaç duymaksızın basit bir karıştırıcıyla karıştırılabilmektedir

Şekil 5.1 deneylerde kullanılan Sasobit® katkısının yapısını göstermektedir.



Şekil 5.1'de Sasobit®'in yapısı

5.1.3.2 Rediset®

Çalışma kapsamında kullanılan Rediset® AkzoNobel firması tarafından üretilmiştir. Rediset® 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 (Walker, 2009).

Bir çeşit katyonik yüzey aktif madde ve kimyasal katkı olan Rediset®, BSK'ya göre üretim sıcaklığında neredeyse 33 °C'lik bir düşüş sağlamaktadır (Chowdhury ve Button, 2008). Üretim sıcaklığındaki bu azalma, enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra günümüz ekolojisinin büyük bir sorunu haline gelen artan karbondioksit

emisyonlarının azalmasına da katkı sağlamaktadır (D'Angelo ve diğer., 2008; Lai ve Tsai, 2008).

Rediset®'in yüzey aktif madde oluşu bitümün “aktif adezyon” ile agrega yüzeyini kaplama yeteneğini artmasını sağlarken, diğer özellikleri bitümün vizkozite değerini düşürmektedir (Lai ve Tsai, 2008; Prowell ve Hurley, 2007).

Rediset® kullanılan diğer IKA katkıları gibi kohezyonu artırıp tekerlek izi oluşumunu azaltırken, soyulmaya karşı direnci artırması özelliği ile kaplamanın servis ömrünü belirleyen neme karşı hassasiyette olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlar (Sengoz ve diğer., 2013a).

Şekil 5.2 deneylerde kullanılan Rediset® katkısının yapısını göstermektedir.



Şekil 5.2 Rediset®'in yapısı

5.1.3.3 Advera®

Advera® içeriğinde yaklaşık %20 oranında su içeriği bulunduran ve PQ Corporation tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilen bir sentetik zeolittir. IKA katkısı olarak kullanıldığı bitümün viskozite değerini düşürerek kullanılacak RAP içeriğini arttıran Advera® aynı zamanda 98°C üzerindeki sıcaklıklarda bitümde

köpüklenmeyi sağlayan bünyesindeki su içeriği sayesinde karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır (Walker, 2009).

Tavsiye edilen kullanım oranı karışımın toplam ağırlığının %0,25'i kadardır Bu orandaki Advera® içeriği bitümün penetrasyon sınıfında değişikliğe sebep olmamaktadır. Karışım ve sıkıştırma sıcaklıklarında BSK'ya oranla 10°C ile 30°C arasında bir düşüş sağlar ve böylelikle zararlı emisyon değerlerinde %60 azalmaya neden olurken, %30 oranında da enerjinin korunumunu sağlar (Rubio ve diğer., 2012).

Şekil 5.3 deneylerde kullanılan Advera® katkısının yapısını göstermektedir.



Şekil 5.3 Advera®'nın yapısı

5.1.3.4 Doğal Zeolit

Atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip olan kristal yapıdaki alümino-silikat bileşiği doğal zeolitte de tıpkı sentetik zeolit gibi içeriğinde su bulundurmaktadır (Grace, 2010). Isıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen “Zeolit” adını almıştır (Altan A., Altan Ö., Alççek, Nalbant ve Akbaş, 1998). Doğada çok çeşitli ve kolaylıkla bulunabilir olan zeolit yapısında büyük değişiklik olmaksızın katyon değişim özelliği gösterebilmektedir. Mineral zeolitler mikroporoz yapısı ve sudaki ve havadaki

kirliliği temizleyebilme özelliği sayesinde endüstride de yaygın olarak kullanılabilir.

Doğal zeolitın İKA katkısı olarak kullanılabilirliği fikri ilk kez Dokuz Eylül Üniversitesi’nde 110M567 No’lu Tübitak projesi ile ortaya atılmıştır. Bu anlamda Dokuz Eylül Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı’nda yapılan deneylerin sonuçları, yaklaşık %20 oranında su içeriği bulunduran doğal zeolitın suyun kaynama noktası seviyelerinde içeriğindeki suyu bırakarak bitümde köpüklenme sağladığını ve böylelikle İKA teknolojisine katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi AlO_4 veya SiO_4 dörtyüzlüsüdür Zeolit iskeleti ikincil yapı ünitelerinin değişik şekillerde üç boyutlu dizilmesiyle ortaya çıkar. Türkiye’de Klinoptilolit, dünyada ise analsim, sabazit, hōlandit, natrolit, filipsittir ve stilbit en yaygın mineral zeolit çeşitlerindendir (Köksaldı, 1999).

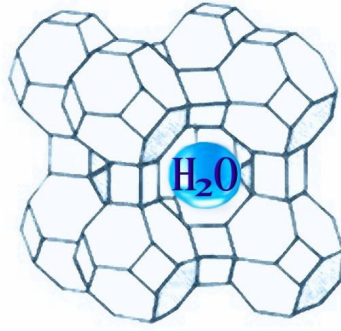
Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal zeolit Türkiye’ de ayrıntılı etüdü yapılmış tek zeolit yatağı olması sebebiyle Manisa-Gördes civarından temin edilmiştir. Bunun yanı sıra, Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise, Türkiye’ nin en önemli zeolit yataklanmaları tespit edilmiş olup kolaylıkla işletilebileceği anlaşılmıştır.

Tablo 5.4’de zeolitın kimyasal yapısı verilmiştir (Altan ve diğer., 1998).

Tablo 5.4’de zeolitın kimyasal yapısı (Altan ve diğer., 1998)

Kimyasal Yapısı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	H ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Ti	Ag	N	B (ppm)
%	71,29	13,55	1,15	3,50	5,90	1,96	0,70	0,60	0,02	0,04	*	30

Şekil 5.4’de ise, zeolitın bal peteği veya kafese benzeyen yapısını göstermektedir.



Şekil 5.4 Zeolitin yapısı

Doğal zeolitin kompleks formülü aşağıdaki gibidir:

- $(Na_3.K_3) (Al_6Si_{30}O_{72}).24H_2O$

Şekil 5.5’de yer alan doğal zeolitlerin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- ✓ İyi kation değişim özellikleri sayesinde ağır metal iyonlarının giderilmesinde önemli rol oynar.
- ✓ Gözenekli yapıları, seçimli emme, katalitik kullanımı, moleküler elek gibi uygulamalarda kolaylık sağlar.
- ✓ Bünyelerinde yüksek oranda su emebilme kabiliyetleri sayesinde tarım ve çeşitli alanlarda sudan faydalanma etkinliğini arttırabilmektedir.
- ✓ Radyoaktif yalıtım veya arıtım uygulamalarında kullanılmaya müsaittirler.
- ✓ Toksin bağlayabilme yetileri gıda teknolojisinde kullanım alanı yaratmaktadır.
- ✓ Aktive-modifiye olarak antibakteriyel, antimikrobiyal v.b. bir çok alanda kullanılırlar.
- ✓ Koku ve nem hapsedebilme özellikleri vardır.
- ✓ Suda çözünmedikleri için uygulandıktan sonra kullanım süreleri uzundur
- ✓ Geri kazanım özellikleri yüksektir böylece sürdürülebilirlerdir.



Şekil 5.5 Doğal zeolitin yapısı

5.2 Deneysel Plan

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Sırasıyla; IKA katkıli bitümlerin üretilmiş, karışımlar oluşturulmuş ve elde edilen numuneler üzerinde İndirek çekme testi (IDT) uygulanmıştır.

5.2.1 IKA Katkıli Bitümlerin Üretimi

Organik ve kimyasal IKA katkıları bitüme agrega ile karıştırma işlemi öncesinde katılmaktadır ve her bir IKA katkısının bitüme karıştırılma oranı ile üretim süre ve sıcaklıkları farklıdır. Deneylerde, bitümün IKA katkılarıyla karıştırılması için verilen gerekli sıcaklıklara getirilmesi ThermoselTM,ye benzer bir ısıtıcı kullanılarak sağlanmıştır ve üretim süresince termometre ile sıcaklık kontrolü yapılmıştır (Şekil 5.6.).



Şekil 5.6 IKA katkıli bitümlerin ısıtıcı kullanılarak üretilmesi

Karıştırma sıcaklıkları deneme yanılma yöntemine göre belirlenmektedir. Bu yöntem, farklı miktarlardaki katkıların farklı sıcaklıklardaki bitüme eklenmesi ve farklı sürelerde karıştırılması şeklinde gerçekleşmektedir. Karıştırma işleminin ardından Organik ve kimyasal IKA katkıli bitümlerin viskozite değerleri dönel viskozite ile incelenir. Bu işlem, parametrelerin sırayla değiştirilmesi ile gerçekleştirilir ve viskozite değerinin sabitlendiği durumdaki kullanılan değerler üretim sıcaklığı ve süresi olarak kabul edilir. Bulunan üretim sıcaklık ve süreleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

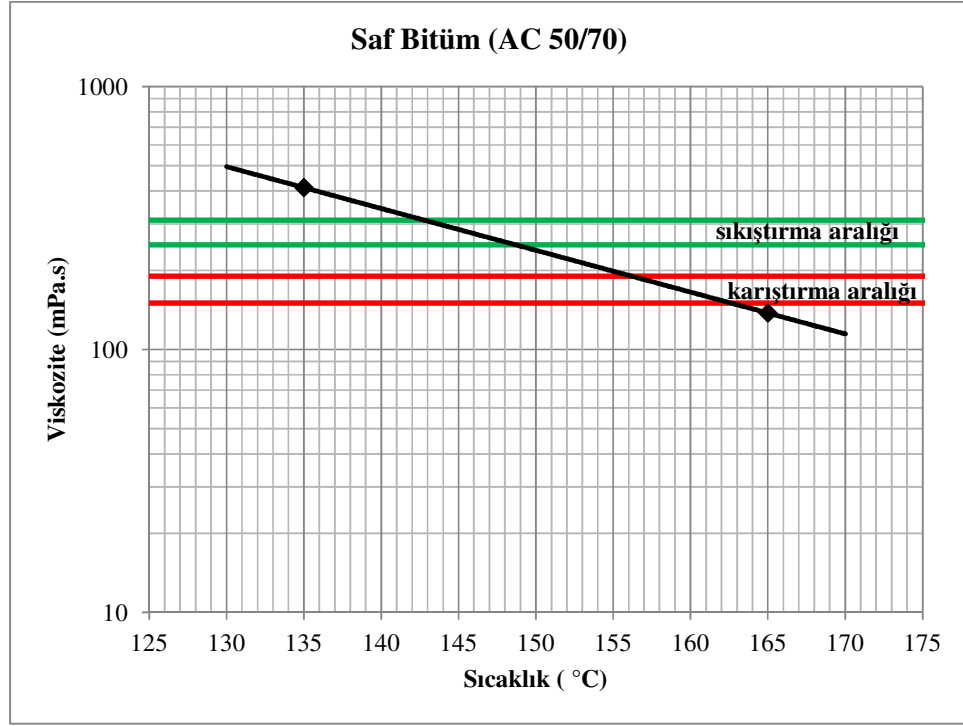
Tablo 5.5 Üretim sıcaklık ve süreleri

Katkı	Üretim Sıcaklığı (°C)	Üretim Süresi (dk.)
Sasobit®	120	10
Rediset®	150	15

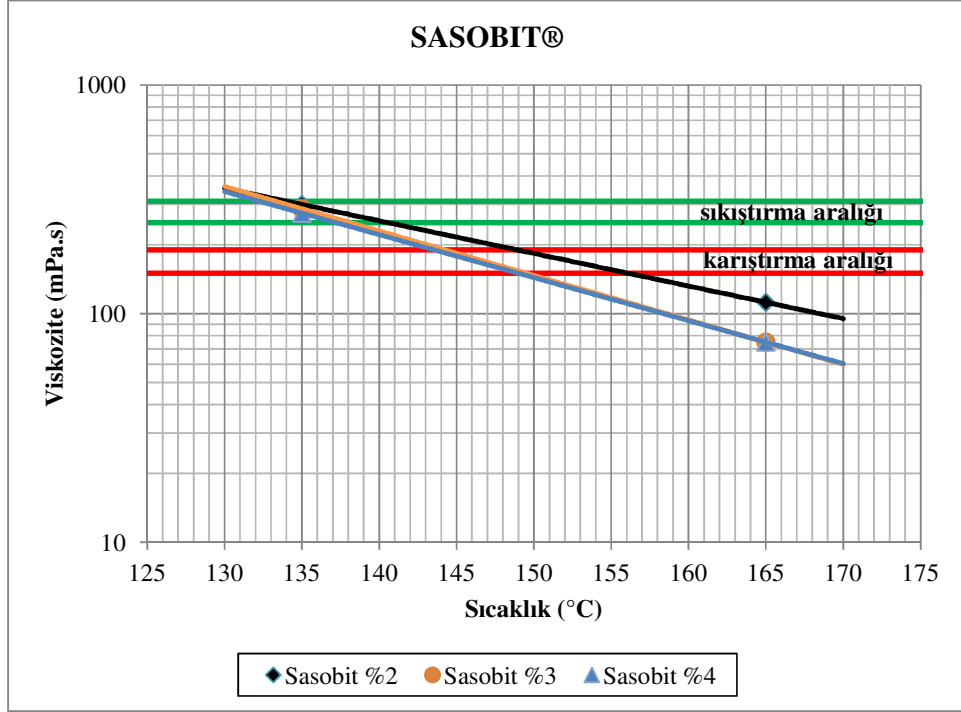
5.2.2 Karışım Oluşturma

Organik ve kimyasal IKA katkıli bitümler üretildikten sonra karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, farklı sıcaklık ve üretim sürelerinde katkıli 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’dir.

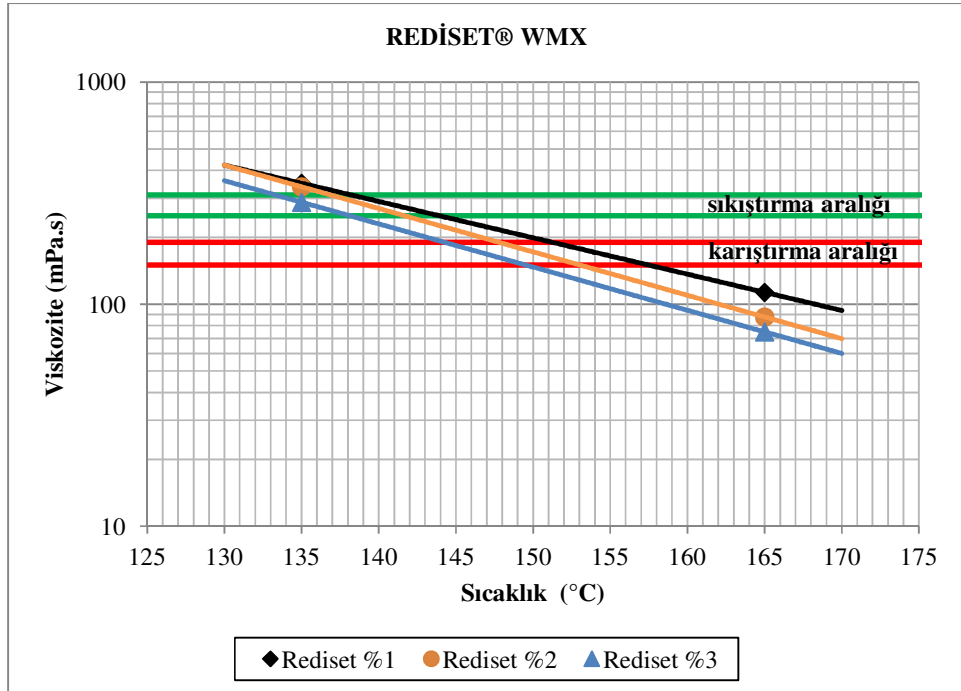
Saf bitüm ile organik ve kimyasal IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları yarı logaritmik grafikler üzerinde şekillerle gösterilmiştir (5.7-5.9).



Şekil 5.7 Saf bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini



Şekil 5.8 Sasobit® katkıli bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini



Şekil 5.9 Rediset® katkıli bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tayini

Filler yapısındaki sentetik ve doğal zeolit içeren bitümlerin viskozite değerlerinin tespit edilmesi çok hassas bir konudur. ASTM standartı filler yapısındaki katkı türü içeren bitümlerin viskozite değerlerinin belirlenmesi ile ilgili aşağıdaki ifadeleri belirtmiştir.

- Tek operatör ile yapılan deneyin standart sapmasının %21 olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, aynı laboratuvarında, aynı operatör tarafından aynı deney malzemeleri kullanılarak elde edilen iki sonuç arasındaki fark %59,4'ü aşarsa eşdeğer düşünülmemelidir.
- Birden fazla operatör ile yapılan deneyin standart sapmasının %33,2 olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, farklı laboratuvarlarda, farklı iki operatör tarafından aynı deney malzemeleri kullanılarak elde edilen iki sonuç arasındaki fark %94,0'ı aşarsa eşdeğer düşünülmemelidir.

Bu ifadeler de dikkate alındığında, filler yapısındaki zeolit içeren bitümlerin viskozite deneylerinin tekrarlanabilirlik değerlerinin çok düşük olduğu görülür. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda, sentetik ve doğal zeolit katkılı bitümlerin depolama stabiliteilerinin de oldukça düşük çıkması sebebiyle bu katkılarının bitüm yerine karışıma eklenmesi önerilir ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmış numunelerin yoğunluklarının BSK yoğunluğu ile kıyaslanmasıyla belirlenir. Tablo 5.6'da tüm katkılar ile hazırlanan karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 5.5 Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

IKA Katkılar	Katkı İçeriği (%)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
Saf Bitüm		156-162	143-148
Sasobit®	3	144-149	133-138
Rediset®	2	148-153	137-142
Advera®	5	147-153	136-141
Doğal Zeolit	5	148-154	137-142

TCK Tip 1 şartnamesine göre hazırlanan 1150 gramlık agrega gradasyonları karıştırma işlemi öncesinde 1 gün süresince ısıtılmış etüvlerde bekletilmelidir. İKA katkılarının üretilmesinin ardından, bitüm agregalar ile belirlenen sıcaklıklar baz alınarak agregalar ile karıştırılır ve karıştırma işlemi sanayi tipi mikser ile yapılır. Karıştırma işleminin ardından dağınık haldeki asfalt numunesi tasarım yöntemine göre Marshall tokmağı ya da yoğurmalı press yardımı ile sıkıştırılır.

5.2.3 İndirek Çekme Deneyi (IDT) ASTM D6931-12

Tasarım yöntemine göre sıkıştırılan numunelerin trafik yükleri altında gösterecekleri performans özelliklerini tayin etmek için gerilme-birim deformanslarını bilmek gerekmektedir. Esneklik modülü, tekrarlı trafik yükü altında gerilme ile geri gelen deformasyon arasındaki ilişkidir. Esneklik modülü tayininde kullanılan deneylerin en önemlileri; doğrudan çekme, kiriş eğilme, dolaylı çekme (indirek çekme) ve üç eksenli basınç deneyidir. Asfalt betonunun esneklik modülünün ölçülmesinde İndirek çekme deneyi (IDT) uygulanmaktadır. Numunelerin esneklik modülünü bulmak için bilinmesi gereken indirek çekme mukavemeti IDT cihazı ile ölçülmektedir.

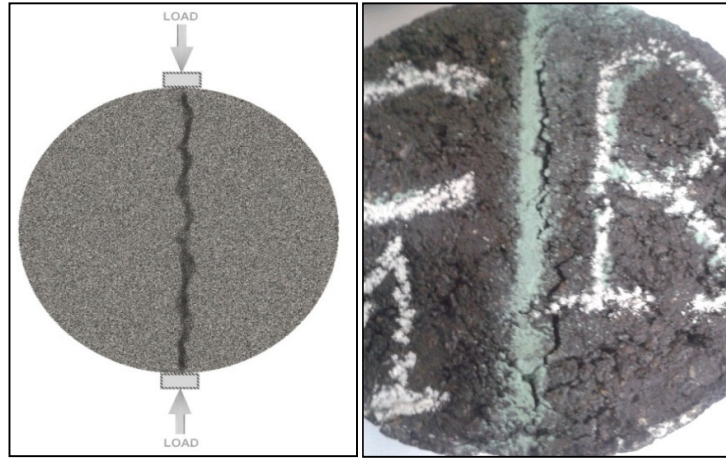
IDT deneyinde izlenen adımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Numunenin kalınlığı, ASTM D3549/D3549M-11 uygun olarak 0,02mm hassasiyetli kumpas yardımıyla, ağırlıkları ise 0,1gr hassasiyetindeki terazi ile ölçülerek kaydedilir.
- Numune vakum cihazı yardımı ile poşetlendirildikten sonra 2 saat 25 °C sıcaklıkta olan su banyosunda bekletilir.
- Numune su banyosundan çıkartıldıktan sonra, poşet içerisinden çıkarılıp Şekil 5.10'de görüldüğü gibi indirekt çekme çerçevesine yerleştirilmelidir. Çerçevenin üst ve alt kısımlarının numunenin tam çapı hizasında olmasına ve ayrıca çerçevenin yan tarafında bulunan demirlerin bir biri ve yükleme ünitesinin demirleri ile paralel olmasına dikkat edilmelidir.

- Numune tamamen doğru bir şekilde yerleştirildikten sonra, yükleme işlemi uygulanarak numunenin Şekil 5.11’de görüldüğü gibi aksenal kırılması sağlanır. Maksimum yük miktarı cihaz ekranından okunup kaydedilir.



Şekil 5.10 Numunenin indirekt çekme mukavemeti ölçümü için cihaza yerleştirilmesi



Şekil 5.11 Deney sonrası aksenal kırılmış numune

ITS deneyi, asfalt numunesinin çekme gerilmelerini belirlemek için uygulanmaktadır. Marshall cihazından okunan ve numunenin dayanabildiği en yüksek yük değeri dikkate alınarak, aşağıda belirtilmiş olan denklem yardımı ile indirekt çekme mukavemeti (kPa) hesaplanmıştır.

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (4.1)$$

Burada:

St = İndirekt çekme mukavemeti (ITS), Mpa

P = Uygulanan maksimum yük, N

t = Numunenin kalınlığı, mm

D = Numunenin çapı, mm

5.3 Deneysel Çalışma Sonuçları

Bu bölümde saf ve ılık karışım asfalt katkıları ilave edilmiş bitümlere ve bu bitümlerle oluşturulmuş asfalt karışımlara uygulanan deneylerin sonuçlarına yer verilmiştir. Katkılı ve saf bitüm üzerinde, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, Marshall ve Superpave karışım tasarımı esaslarına göre üretilen IKA ve BSK üzerinde ise, boşluk oranı, stabilite ve akma deneyi ile optimum bitüm miktarı tayini deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri ile üretilen karışımların özellikleri karşılaştırılmıştır.

5.3.1 Bitüm Testi Sonuçları

Deneylerde kullanılan bitüm üzerinde Penetrasyon ve Yumuşama Noktası deneyleri uygulanmış ve elde edilen veriler tablolar halinde sunulmuştur.

5.3.1.1 Penetrasyon Deneyi Sonuçları (ASTM D5/D5M-13)

Saf ve IKA katkıli bitümler üzerinde kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırma uygulamalarının öncesi ve sonrasında penetrasyon testi uygulanmıştır. Tablo 5.6 ve 5.7'de bu deneylerin sonuçları verilmiştir.

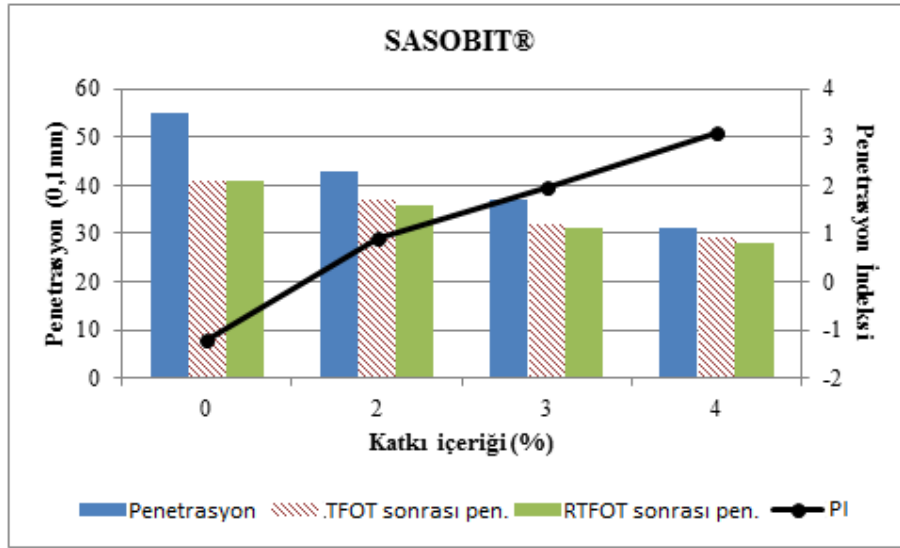
Tablo 5.6 TFOT öncesi ve sonrası penetrasyon testi sonuçları

Bitüm Çeşiti	Kullanılan Bitüm Miktarına göre Katkı İçeriği (%)	Penetrasyon (0,1mm)	Penetrasyon İndeksi	TFOT Sonrası Penetrasyon (0,1mm)	Penetrasyon Değişimi (%)	TFOT Süresince Kütle Kaybı
Saf Bitüm	0	55	-1,20	41	25	0,04
Sasobit®	2	43	0,89	37	14	0,07
	3	37	1,95	32	13	0,07
	4	31	3,07	29	6	0,08
Rediset®	1	48	-0,04	39	19	0,06
	2	44	0,04	37	16	0,04
	3	40	0,09	35	13	0,06
Advera®	4	53	-0,22	44	17	0,15
	5	52	0,27	43	16	0,16
	6	45	0,74	40	11	0,16
Doğal Zeolit	4	53	-0,10	44	17	0,16
	5	51	0,02	43	15	0,16
	6	45	0,40	41	10	0,17

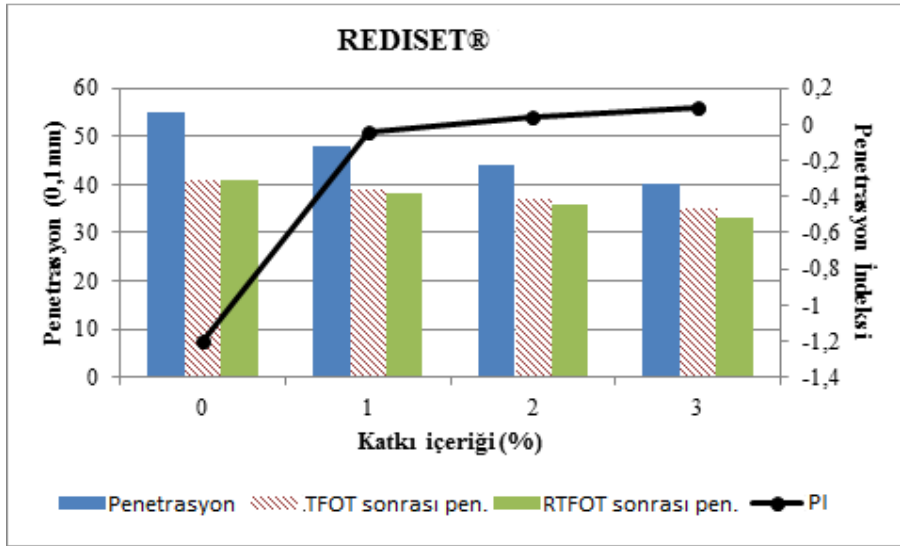
Tablo 5.7 RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon testi sonuçları

Bitüm Çeşiti	Kullanılan Bitüm Miktarına göre Katkı İçeriği (%)	Penetrasyon (0,1mm)	Penetrasyon İndeksi	RTFOT Sonrası Penetrasyon (0,1mm)	Penetrasyon Değişimi (%)	RTFOT Süresince Kütle Kaybı
Saf Bitüm	0	55	-1,20	41	26	-0,04
Sasobit®	2	43	0,89	36	16	-0,07
	3	37	1,95	31	15	-0,07
	4	31	3,07	28	10	-0,08
Rediset®	1	48	-0,04	38	22	-0,06
	2	44	0,04	36	17	-0,07
	3	40	0,09	33	17	-0,08
Advera®	4	53	-0,22	42	21	-0,17
	5	52	0,27	41	21	-0,18
	6	45	0,74	39	14	-0,18
Doğal Zeolit	4	53	-0,10	43	18	-0,17
	5	51	0,02	42	17	-0,17
	6	45	0,40	38	15	-0,17

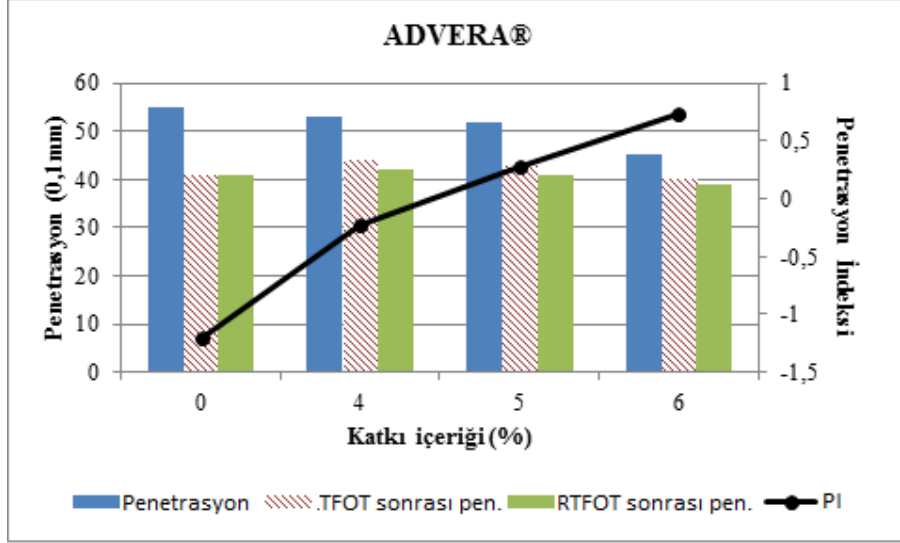
Şekil 5.12-5.15 incelendiğinde, İKA katkıları kullanımının bitümün penetrasyon değerini düşürdüğü görülmektedir. Ancak; köpükendirme sağlayan katkıların (sentetik ve doğal zeolit) kullanıldığı bitümlerin penetrasyon değerlerindeki azalma diğer katkıların (Sasobit®, Rediset®) kullanıldığı bitümlerdeki azalmaya oranla daha düşüktür. Ayrıca, katkı içeriği arttıkça Penetrasyon İndeksinde düşüş gözlenmektedir.



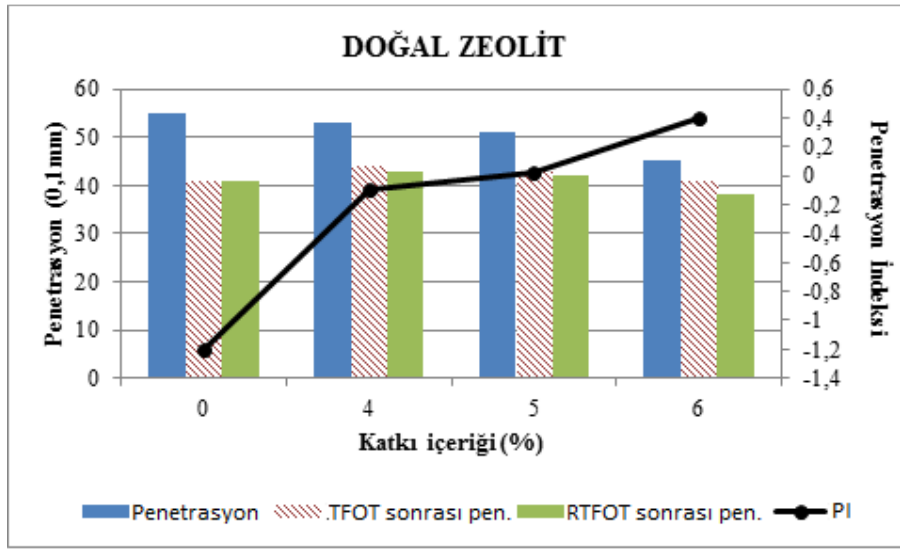
Şekil 5.12 Sasobit® katkı bitüm için Penetrasyon Testi sonuçları



Şekil 5.13 Rediset® katkı bitüm için Penetrasyon Testi sonuçları



Şekil 5.14 Advera® katkılı bitüm için Penetrasyon Testi sonuçları



Şekil 5.15. Doğal Zeolit katkılı bitüm için Penetrasyon Testi sonuçları

İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT) ve Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) laboratuvar ortamındaki bitümün kısa dönem yaşlanmasını yansıtmak amacıyla kullanılan yöntemlerdir (Aghazadeh Dokandari, 2012). Tez kapsamında TFOT ile RTFOT uygulanan Sasobit®, Rediset®, Advera® ve doğal zeolit katkılı bitümlerde 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, Sasobit® katkıli bitümün en yüksek PI değerini sağladığı görülmüştür. Bu özellik, iklim sıcaklığının geniş aralıklı olduğu bölgelerde Sasobit® katkısının kullanımına olanak sağlamaktadır (Sengoz, Topal, Gorkem, 2013b).

Ayrıca, köpüklenmeli katkıler (Advera® ve doğal zeolit) ile modifiye edilmiş bitümlerdeki TFOT ve RTFOT sonrası kütle değişimi değerleri diğer katkıler ile modifiye edilmiş bitümlere oranla daha yüksektir ve bu olay deney esnasında yüksek sıcaklıklarda su partiküllerinin buharlaşması ile açıklanabilir.

5.3.1.2 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Bu bölüm TFOT ve RTFOT öncesi ve sonrası saf ve İKA katkıli bitümün yumuşama noktası deneyi sonuçlarını kapsamaktadır. Sonuçlar Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.8 TFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları

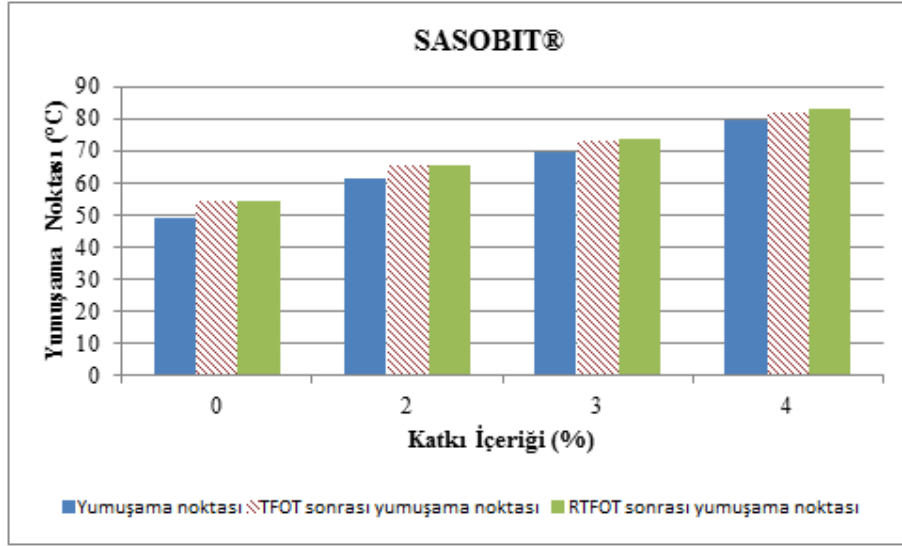
Bitüm Çeşiti	Kullanılan Bitüm Miktarına göre Katkı İçeriği (%)	Yumuşama Noktası (°C)	TFOT Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası Değişimi (°C)
Saf Bitüm	0	49,1	54,1	5,0
Sasobit®	2	61,2	65,5	4,3
	3	69,3	73,3	4,0
	4	79,5	82,0	2,5
Rediset®	1	55,4	58,8	3,4
	2	56,7	59,2	2,5
	3	58,0	59,5	1,5
Advera®	4	53,6	58,2	4,7
	5	56,0	60,1	4,1
	6	59,9	63,1	3,3
Doğal Zeolit	4	54,1	58,1	4,0
	5	55,0	58,7	3,7
	6	58,2	61,7	3,5

Tablo 5.9 RTFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları

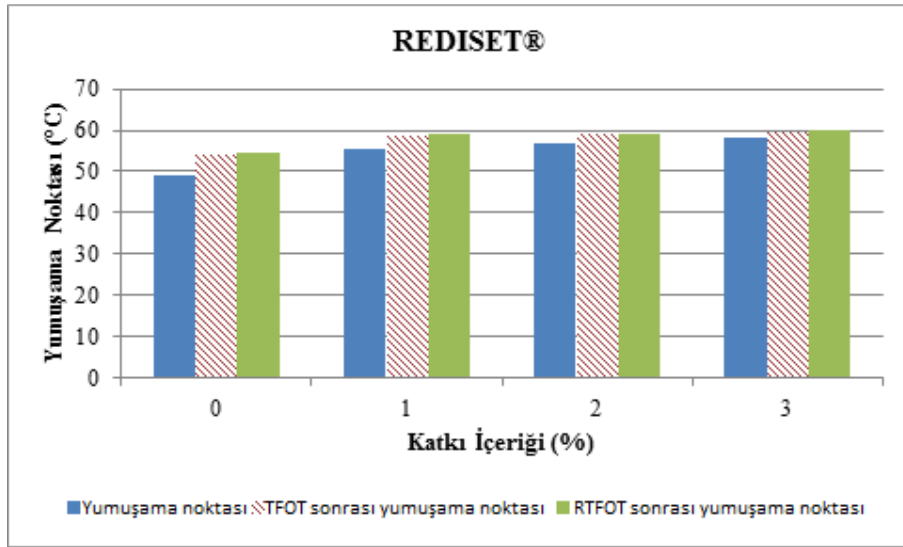
Bitüm Çeşiti	Kullanılan Bitüm Miktarına göre Katkı İçeriği (%)	Yumuşama Noktası (°C)	RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası Değişimi (°C)
Saf Bitüm	0	49,1	54,4	5,3
Sasobit®	2	61,2	65,7	4,5
	3	69,3	73,6	4,3
	4	79,5	83,0	3,5
Rediset®	1	55,4	59,0	3,6
	2	56,7	59,2	2,5
	3	58,0	60,1	2,1
Advera®	4	53,6	58,3	4,8
	5	56,0	60,5	4,5
	6	59,9	63,5	3,7
Doğal Zeolit	4	54,1	58,4	4,3
	5	55,0	58,7	3,7
	6	58,2	61,4	3,2

Yumuşama noktasındaki artış, kalıcı deformasyonlara (tekerlek izi) duyarlılığı azalttığı için aranan bir özelliktir (Sengoz ve Isıkyakar, 2008). IKA katkıları kullanımının bitümün yumuşama noktası değerlerini arttırdığını göstermektedir. Özellikle; Sasobit® katkısı kullanılarak hazırlanmış bitümün yumuşama noktasındaki artış daha belirgindir.

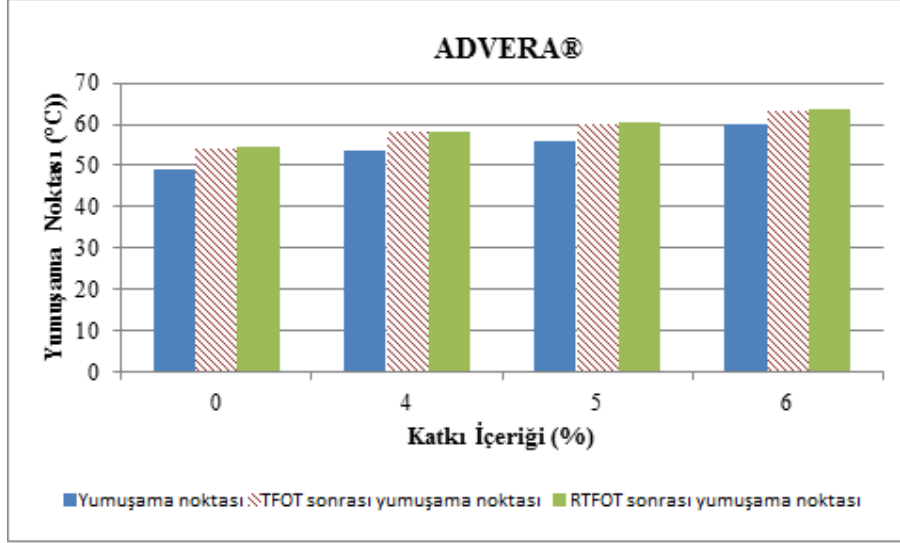
Saf ve katkılı bitümlerin TFOT ve RTFOT sonrasındaki yumuşama noktası değişimleri, IKA teknolojisinin düşük uygulama sıcaklıklarının yanısıra IKA katkılarının yapılarının da yaşlanmaya karşı direnci arttırdığını göstermektedir. Şekil 5.16-5.19 IKA katkılı bitümlerin TFOT ve RTFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçlarını göstermektedir.



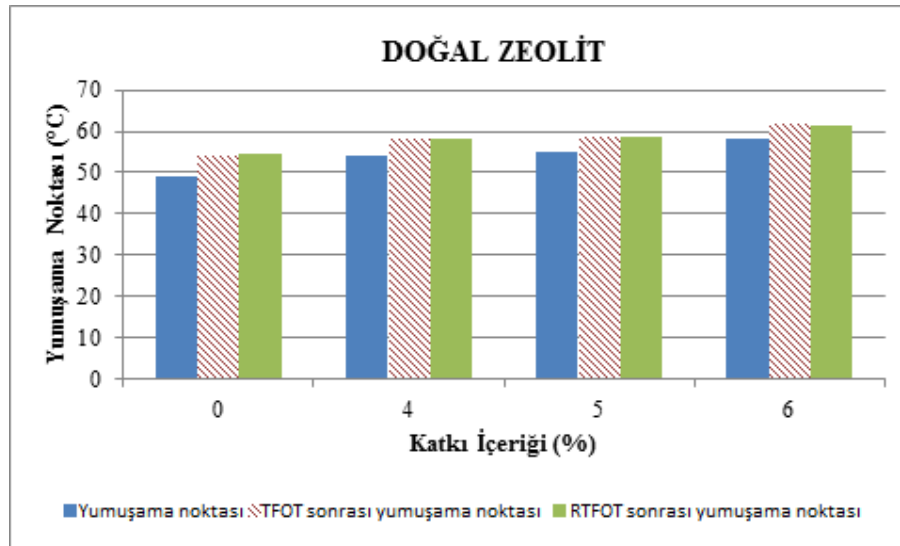
Şekil 5.16 Sasobit® katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları



Şekil 5.17 Rediset® WMX katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları



Şekil 5.18 Advera® katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları



Şekil 5.19 Doğal zeolit katkılı bitüm için yumuşama noktası testi sonuçları

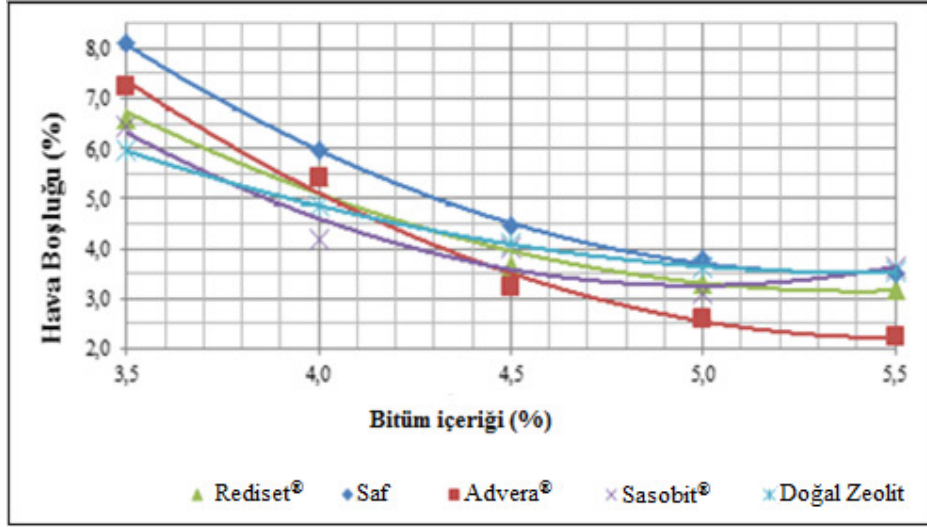
5.3.3 Karışım Deneyleri Sonuçları

Bu bölümde farklı tasarım yöntemlerine göre sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan deneylere yer verilmiştir. Saf ve IKA katkılı bitümler kullanılarak Marshall ve Superpave tasarım yöntemlerine göre sıkıştırılmış numunelerin optimum bitüm miktarları bulunmuş ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

5.3.3.1 Marshall Tasarım Yöntemi için Optimum Bitüm Miktarı Sonuçları

Saf ve IKA katkıli karışımların Marshall tasarım yöntemi ile optimum bitüm oranının tespit edilmesi için, farklı bitüm içeriklerindeki numuneler ASTM D1559-89 standardına göre hazırlanmıştır. DEU Ulaştırma Laboratuvarında 110M567 No'lu Tübitak MAG projesi kapsamında gerçekleştirilen önceki çalışmalarda, herbir farklı katkı türüne göre farklı optimum bitüm oranları ve IKA katkı içerikleri bulunmuştur. Optimum IKA katkı içerikleri, Sasobit® için %3, Rediset® için %2, Advera® ve doğal zeolit için ise %5 olarak belirlenmiştir. Herbir farklı katkı türü için farklı bitüm içerikleri ile hazırlanmış Marshall numunelerinin yükseklikleri, havadaki, sudaki ve KYD ağırlıkları tespit edilmiş ve bu değerler kullanılarak boşluk oranları elde edilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 5.20'da gösterilmiştir.

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 5.20'daki eğriler yardımı ile optimum bitüm miktarları, saf, Sasobit®, Rediset®, Advera® ve doğal zeolit katkıli karışımlar için sırasıyla, %4,76, %4,25, %4,46, %4,32 ve %4,56 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları detaylı olarak Ekler bölümünde verilmiştir.



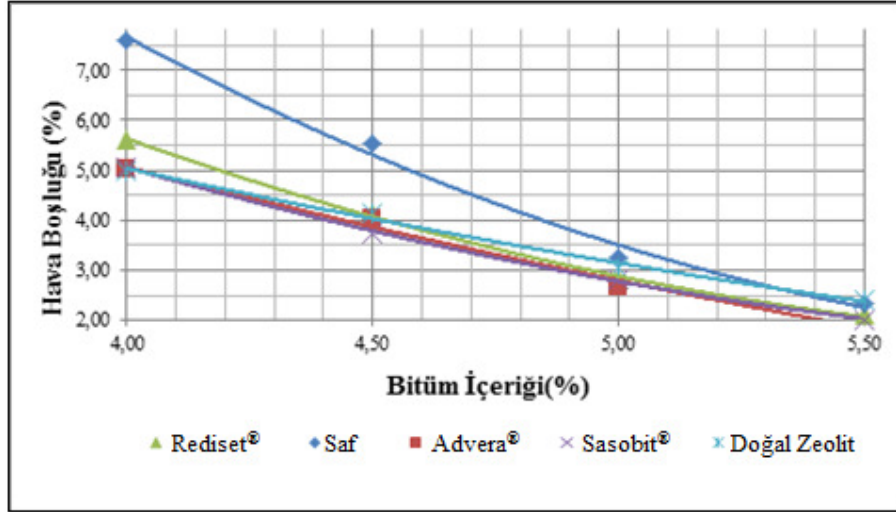
Şekil 5.20 Marshall yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri

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.

5.3.3.2 Superpave Tasarım Yöntemi için Optimum Bitüm Miktarı Sonuçları

Superpave tasarım yöntemi için kullanılan katkı miktarları, Marshall yönteminde kullanılan optimum katkı miktarları ile aynıdır. Superpave tasarım yöntemine göre yoğurmalı pres kullanılarak sıkıştırılan farklı bitüm oranlarındaki saf ve IKA katkılı numuneler için, %4 hava boşluğu kriteri dikkate alınarak optimum bitüm miktarı tayini yapılır. N_{max} değerine kadar sıkıştırılan numunelerin boşluk oranlarının tespit edilmesinin ardından, Dokuz Eylül Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarında mevcut Tübitak MAG 110M567 No'lu proje desteğiyle alınan yoğurmalı presin sıkıştırma esnasında kaydettiği veriler sayesinde N_{des} değerindeki boşluk miktarına geçiş yapılabilmektedir. Böylece, N_{des} değerindeki saf ve IKA katkılı asfalt numunelerinin %4 hava boşluğu sağlayan bitüm miktarı, optimum bitüm miktarı olarak belirlenir. Buna göre, BSK, Sasobit®, Rediset®, Advera® ve doğal zeolit katkılı karışımlar için optimum bitüm miktarları sırasıyla, %4,83, %4,4, %4,51, %4,42 ve %4,5 olarak

bulunmuştur. Şekil 5.21’de hazırlanan numunelerin boşluk oranlarının bitüm yüzdesi ile değişimini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 5.21 Superpave yönteminde %4 boşluğa denk gelen optimum bitüm içerikleri

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 Sasobit® katkısına aittir.

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 (Kanneganti, 2002). Nelson’ın 2005 yılında doğal kum kullanarak Superpave ve Marshall tasarım yöntemlerini kıyasladığı çalışma da göz önüne alındığında, doğal zeolit karışım içerisinde filler etkisi yarattığı ve Superpave tasarım yöntemi için yuvarlak parçacık yapısındaki agregaların gerekli bitüm miktarını Marshall tasarım yöntemine kıyasla düşürdüğü sonucu çıkarılabilir (Nelson, 2005). Yoğurmalı sıkıştırılarda, 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, Sasobit[®], Rediset[®]. Advera[®] 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.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

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, Sasobit[®], Rediset[®], Advera[®] ve adı geçen katkıları 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 artırarak agreganın daha düşük bitüm miktarlarıyla kaplanma özelliğini kazandırması gösterilebilir. Buna ek olarak, köpüklendirme teknolojisi katkılarından Advera[®] ve doğal zeolitin bitüm hacmini artırma özelliğinin de gerekli optimum bitüm oranını düşürmekte rol oynadığı düşünülebilir.

Tez çalışması kapsamında, Marshall ve Superpave yöntemleri için gerekli bitüm oranları da birbirleri ile karşılaştırılmıştır. IKA katkılarından Sasobit[®], Rediset[®] ve Advera[®] için 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 sıkıştırılarda, filler ve doğal zeolit gibi küçük parçacıkların Marshall yöntemindeki darbeli sıkıştırılmayla karşılaştırıldığında boşlukları daha iyi doldurduğu bu sayede de gerekli bitüm miktarını düşürdüğü şeklinde açıklanabilir.

Superpave tasarım yöntemi ile hazırlanan Sasobit[®], Rediset[®] ve Advera[®] katkıları içeren karışımlar için optimum bitüm oranının daha yüksek çıkması, bu alanda daha

fazla çalışmaların yapılması önerisini yaratmaktadır. Bu anlamda, ülkemiz 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, Sasobit[®], Rediset[®], Advera[®] ve doğal zeolit katkılı bitümler üzerinde uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite deneyleri sonucunda IKA teknolojisinin sıcaklık duyarlılığını azalttığı, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci arttırdığı söylenbilir. 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.

REFERANSLAR

Aghazadeh Dokandari, P. (2012). *Effects Of Warm Mix Asphalt Additives on Aging Characteristics of Bituminous Mixtures*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Aguiar-Moya P., Jorge Prozzi A., ve Tahmoressi M. (2007). Optimum Number of Superpave Gyration Based on Project Requirements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2001, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 84–92.

Altan, A., Altan, Ö., Alçiçek, A., Nalbant, M. ve Akbaş Y. (1998) Tavukçulukta Doğal Zeolit Kullanımı, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35, 1-2-3, 9-16.

Anderson, R. M., Turner P. A., Peterson R. L., Mallick R. B. (2002). *NCHRP Report 478: Relationship of Superpave Gyration Compaction Properties to HMA Rutting Behavior*. TRB, National Research Council, Washington, D.C.

Asphalt Institute. (1996). *Superpave Mix Design: Superpave Series No:2 (SP-2)*. Asphalt Institute. Lexington, KY.

ASTM D1559 – 89, American Society for Testing and Materials, (1989). *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C131-06, American Society for Testing and Materials, (2006). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C1252-06, American Society for Testing and Materials, (2006). *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D1113-07, American Society for Testing and Materials, (2007). *Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D70-09e1, American Society for Testing and Materials, (2009). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D1754/D1754M-09, American Society for Testing and Materials, (2009). *Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D6925-09, American Society for Testing and Materials, (2009). *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D2419-09, American Society for Testing and Materials, (2009). *Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D4791-10, American Society for Testing and Materials, (2010). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D3387-11, American Society for Testing and Materials, (2011). *Standard Test Method for Compaction and Shear Properties of Bituminous Mixtures by*

Means of the U.S. Corps of Engineers Gyrotory Testing Machine (GTM).
American Society for Testing and Materials.

ASTM D2172/D2172M-11, American Society for Testing and Materials, (2011).
Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. American Society for Testing and Materials.

ASTM D2041/D2041M-11, American Society for Testing and Materials, (2011).
Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. American Society for Testing and Materials.

ASTM D3549/D3549M-11, American Society for Testing and Materials, (2011).
Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Bituminous Paving Mixture Specimens. American Society for Testing and Materials.

ASTM C127-12, American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.* American Society for Testing and Materials.

ASTM C128-12, American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.* American Society for Testing and Materials.

ASTM D92-12b, American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.* American Society for Testing and Materials.

ASTMD6931-12, American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures.* American Society for Testing and Materials.

ASTM D36/D36M-12, American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D2726/D2726M-13, American Society for Testing and Materials, (2013). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D5821-13, American Society for Testing and Materials, (2013). *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C88-13, American Society for Testing and Materials, (2013). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D5/D5M-13, American Society for Testing and Materials, (2013). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials.

ASTM D4402/D4402M-13, American Society for Testing and Materials, (2013). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials.

Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W. ve Mooney, K. (2010). Assessment of workability and compactability of warm-mix asphalt. *Transportation Research Record*, 36-47.

Brown, R. (2000). *Interim Report*. 31st Annual Rock Mountain Asphalt Conference, Colorado State University, USA.

- Buchanan, M.S., Brown, R. (2001). Effect of Superpave Gyratory Compactor Type on Compactor Type on Compacted Hot-Mix Asphalt Density, *Transportation Research Record*, 1761, 50-60.
- Bueche, N. (2009). Warm Asphalt Bituminous Mixtures with Regards to Energy. *Emissions and Performance Young Researchers Seminar (YRS) LAVOC-CONF-2010-002*, Torino, Italy.
- Button, J.W., Estakhri, C. ve Wimsatt, A. (2007). *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. FHA Report 0-5597-1, Texas Transportation Institute.
- Button, J.W., Little, D.N., Jagadam ve V. And Pendelton, O.J. (1994). Correlation of Selected Laboratory Compaction Methods with Field Compaction. *Transportation Research Record*, 1454, 193-201.
- Butz, T., Rahimian, I. ve Hildebrand, G. (2001). Modification of road bitumen with the Fischer-Tropsch paraffin Sasobit. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology I* (2), 70-86.).
- Cengel, Y. A. ve Boles, M. A. (2008). *Thermodynamics : an engineering approach* (6th ed.). Boston: McGraw-Hill Higher Education.
- Chevron. (1977). *Bitumuls Mix Manual*, California: Asphalt Division.
- Chowdhury, A. ve Button, J. W. (2008). *A review of warm mix asphalt*. Texas A&M University System College Station: Texas Transportation Institute, Texas 77843-3135.
- Consuerga, A., Little, D.N. ve Von Quintos, H. And Burati Jr, J.L. (1989). Comparative Evaluation of Labratory Compaction Devices Based on Their Ability to Produce Mixtures with Engineering Properties Similar to Those Produced in the Field. *Transportation Research Record*, 1228.

- Croteau, J. M. ve Tessier, B. (2008). *Warm mix asphalt paving technologies: A Road Builder's Perspective*. Ottawa: 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser ve diğeri. (2008). *Warm-Mix asphalt: European practise*. Washington, DC: American Trade Initiatives.
- Damm, K. W., Abraham, J., Butz, T., Hildebrand, G. ve Riebeschl, G. (2002). Asphalt flow improvers as 'intelligent fillers' for hot asphalts - a new chapter in asphalt technology. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, 36-69.
- Dasa, P. K., Tasdemir, Y. ve Birgissona, B. (2012). Evaluation of fracture and moisture damage performance of wax modified asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13, 142–155.
- DeVol, J.R., Krause, J. K., McLaughlin, S. P., Willoughby, K. ve McLean, I. (2007). *Superpave Gyrotory Compactor Internal Angle of Gyration Study*, Bituminous Materials Report.
- Diaz, D. (2003). *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.
- Estakhri, C., Button, J. ve Alvarez, A. E. (2010). *Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas*. Texas Department of Transportation 77843-3135.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA), (2010). *The use of Warm Mix Asphalt*, Rue du Commerce 77, 1040 Brussels, Belgium.
- Freund, M. I. ve Mózes, G. (1982). *Paraffin products : properties, technologies, applications*. Amsterdam, New York.

- Gandhi, T. (2008). *Effects of warm mix asphalt additives on asphalt binder and mixture properties*. South Carolina: Clemson University.
- Grace, W. R. (2010). *Zeolite structure*, Web Site of Grace Co., Kasım 2013, <http://www.grace.com/EngineeredMaterials/MaterialSciences/Zeolites/ZeoliteStructure.aspx>
- Habib, A., Hossain, M., Kaldate, R. ve Fager, G. A. (1998). *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).
- Harman, T., D'Angelo, J.A. ve Bukowski, J. (2002). *Superpave: Asphalt Mixture Design Workshop*. Federal Highway Administration, Washington D.C.
- Harman, T., Bukowski, J., Moutier, F., Huber, G. ve McGennis, R. (2001). *The History and Future Challenges of Gyrotory Compaction 1939 to 2001*. Federal Highway Administration, Washington D.C.
- Harmelink, D., Aschenbrener, T. ve Shuler, S. (2007). *Achieving 4% Air Voids in Real Pavements with Superpave* *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2040, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 115–122.
- Huber A. G. (1996). *Development of the Superpave Gyrotory Compactor*. The Superpave Asphalt Research Program, The University of Texas, Austin.
- Hurley, G. C. ve Prowell, B. D. (2005). *Evaluation of sasobit® for use in warm mix asphalt*. Auburn, US: National Center for Asphalt Technology.

- Hurley, G. C. ve Prowell, B. D. (2006a). Evaluation of potential process for use in warm mix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.*, 75, 41-90.
- Hurley, G. C. ve Prowell, B. D. (2006b). *Evaluation of evotherm® for use in warm mix asphalt.* Auburn, US: National Center for Asphalt Technology.
- Indiana Department of Transportation - INDOT. (2001). *Certified Hot Mix Asphalt Technician Program, Procedures and Policies Manual.*, Indianapolis.
- Jackson, N.M. ve Czor, J. (2003). 100-mm-Diameter Mold Used with Superpave Gyratory Compactor. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 60-66.
- Kandhal, P. S. ve Koehler W.S. (1985). Marshall Mix Design Method: Current Practices, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 54, 284-303.
- Kanitpong, K., Nam, K., Martono, W. ve Bahia, H. (2008). Evaluation of a warmmix asphalt additive. *Construction Materials*, 161 (CM1), 1-8.
- Kanneganti, V. (2002). *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.
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Harold, V.Q., ve diğer. (1994). Superior performing asphalt pavements: The product of the SHRP asphalt research program, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Keskin, M. (2011). *Superpave Ve Marshall Dizayn Yöntemleri İle Üretilmiş Asfalt Numunelerin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerindeki Farklılıkların Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Khan, Z.A., Al-Abdul Wahab, H.I., Asi ve I. And Ramadhan, R. (1998). Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. *Construction and Building Materials*, 12(6-7), 373-384.
- Koenders, B.G., Stoker, D.A., Bowen, C., de Groot, P., Larsen, O., Hardy, D. ve Wilms K.P. (2000). *Innovative Processes in Asphalt Production and Application to Obtain Lower Operating Temperatures*. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, İspanya.
- Köksaldı, V. (1999) *Gördes ve Yenikent Zeolitlerinin Temel Tarımsal Özellikleri ve Bitki Yetiştirme Ortamı Olarak Kullanım Olanakları*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kristjansdottr, O., Muench, S. T., Michael, L. ve Burke, G. (2007). Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. *Transportation Research Record 2040*, 91-99.
- Kuennen, T. (2004). Warm Mixes are a Hot Topic. *Better Roads*, James Informational Media, Inc., Des Plaines, Illinois.
- Kvasnak, A., West, R., Moore, J., Nelson, J., Turner, P. ve Tran, N. (2009). *Case study of warm mix asphalt moisture susceptibility in Birmingham*. Transportation Research Board 88th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, DC.
- Lai, J. S. ve Tsai, J. Y. (2008). *Evaluating constructability and properties of Advera and REVIX warm mix asphalt : final report*. Forest Park, Ga.: Georgia Dept. of Education Office of Materials & Research.
- Larsen, O.R. (2001). *Warm Asphalt Mix with Foam: WAM-Foam*. IRF 2001 Partie B: Thèmes Techniques, S.00469. Kolo Veidekke, Norveç.

- Larsen, O.R., Moen, O., Robertus, C. ve Koenders, B.G. (2004). WAM-Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. *Proceedings, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vienna.
- Maupin, G.W. (1998). *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, USA.
- McGennis, R.B., Anderson, R.M., Perdomo, D. ve Turner, P. (1996). Issues Pertaining to Use of Superpave Gyratory Compactor, *Transportation Research Record, 1543*, 139-144.
- McKenzie, P. (2006). Taking a Closer Look at Warm Mix. *Better Roads, 76* (6), June 2006, 64-69.
- Middleton, B. ve Forfylow, B. (2008). *An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process*. Calgary, AB: 7th International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA).
- Nallamothu, H.S. (2003). *Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance*. Yüksek Lisans Tezi, West Virginia University, College of Engineering and Mineral Resources, Morgantown, WV.
- Namlı, R. ve Kuloglu, N. (2007). Superpave ve Marshall Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırması, *İMO Teknik Dergi, 270*, 4103-4118.
- Nelson, J. (2005). *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.

- Oliver, J., Alderson, A., Milne, P. (2007). *A Review of Austroads Gyrotory Compaction Research*, Austroads Report, Sydney
- Oylumluoğlu, J. (2012). The Utilization Of Recycled Asphalt Concrete with Warm Mix Asphalt, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Porter, A. (2011). *Sensitivity of warm mix asphalt to temperature, binder content, and laboratory stripping performance*. Yüksek Lisans Tezi, University of Arkansas. UMI Dissertation Publishing, Michigan.
- Prowell, B. D. ve Hurley, G. C. (2007). *Warm-mix asphalt: best practices*. National Asphalt Pavement Association.
- Prowell, B. D., Brown, E.R. ve Huner, M. (2003). *Evaluation Of The Internal Angle Of Gyration Of Superpave Gyrotory Compactors In Alabama*, National Center For Asphalt Technology (Ncat) Report 03-04.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D. ve Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD.
- Rubio, M. C., Martinez, G., Baena, L. ve Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Sargand, S., Figueroa, J. L., Edwards, W. ve Al-Rawashdeh, A. S. (2009). *Performance assessment of warm mix asphalt (WMA) pavements*. Athens, OH: Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (ORITE).
- Sasol wax, (2014). *Sasobit Asphalt Technology*, 27 Ocak, 2014, <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html>

- Sengöz, B. (1997). *Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına ve suya duyarlılığına etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sengoz, B. ve Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 424–432.
- Sengoz, B., Topal A. ve Gorkem C. (2013a). Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite, *Road Materials and Pavement Design*, 14, 4.
- Sengoz, B., Topal A. ve Gorkem, C. (2013b). Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives, *Construction and Building Materials*, 43, 242–252.
- Shell Bitumen, (2011). *Shell WAM foam process for reducing energy consumption and emissions*. Shell Bitumen.
- Superpave Mix Design, (2001). 3rd ed., Asphalt Institute, Lexington Kentucky.
- Swami, B. L., Mehta, Y. A. ve Bose, S. (2004). A Comparison of Marshall and Superpave Design for Materials Sourced in India. *The International Journal of Pavement Engineering (IJPE)*, 5 (3), September, 163–173.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- The Asphalt Pavement Association of Oregon, (2003). *Warm mix asphalt shows promise for cost reduction, environmental benefit*. The Asphalt Pavement Association of Oregon.

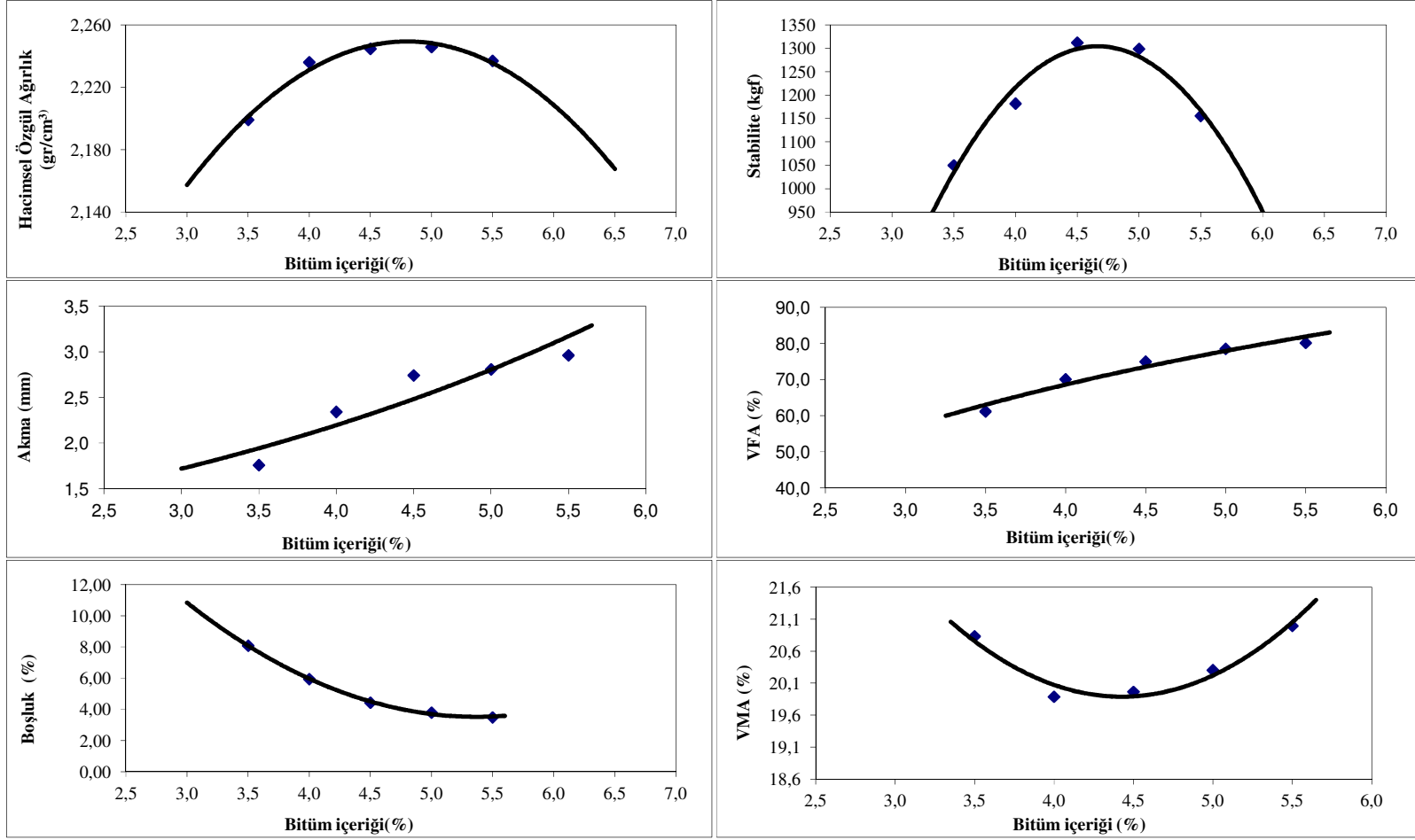
- Topal, A. (2008). *Agregaların Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Yeni Görüntü Analiz Yöntemleri Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Topal, A. (2001). *Fine Aggregate Angularity in Turkey in Bituminous Mixtures*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Topal, A. ve Sengöz, B. (2005). Determination of fine aggregate angularity in relation with to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19, 155-163.
- Vaitkus, A., Cygas, D., Laurinavicius, A. ve Perveneckas, Z. (2009). Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in lithuania. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), 80-86.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A. ve Botella, R. (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 25(3), 1289-1297.
- Vallerga, B.A. (1951). Recent Laboratory Compaction Studies of Bituminous Paving Mixtures. *Proceeding Association of Asphalt Paving Technologists*, 21, 117-153.
- Walker, D. (2009). *Gaining experience with Warm Mix Asphalt*, The Magazine of the Asphalt Institute.
- Watson, D. E., Brown R. ve Moore J. (2005). Comparison of Superpave and Marshall Mix Performance in Alabama, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 133–140.

- White, T.D. (1985). Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures, *Asphalt Paving Technology*, 54, 265-284.
- Xiao, F. ve Amirkhanian, S. N. (2010). Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1649-1655.
- Zaumanis, M. (2010). *Warm mix asphalt investigation*. Kongens.Lyngby: Technical University of Denmark.
- Zeleeuw, H., Paugh, C., Corrigan, M., Belagutti, S. ve Ramakrishnareddy, J. (2013). Laboratory evaluation of the mechanical properties of plant-produced warm-mix asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14, 49–70.
- Zettler, R. (2006). *Warm Mix Stands Up to Its Trials*. Better Roads, Des Plaines, Illinois.
- Ziauddin, A.K., Hamad, I.A.W., Ibrahim, A. ve Rezgallah, R. (1998). *Comparative Study of Asphalt Concrete Laboratory Compaction Methods to Simulate Field Compaction*. Research report, Center for Engineering Research, Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia.

EK A
MARSHALL KARIŞIM TASARIMI

Tablo A.1 Saf bitüm için Marshall karışım tasarımı verileri

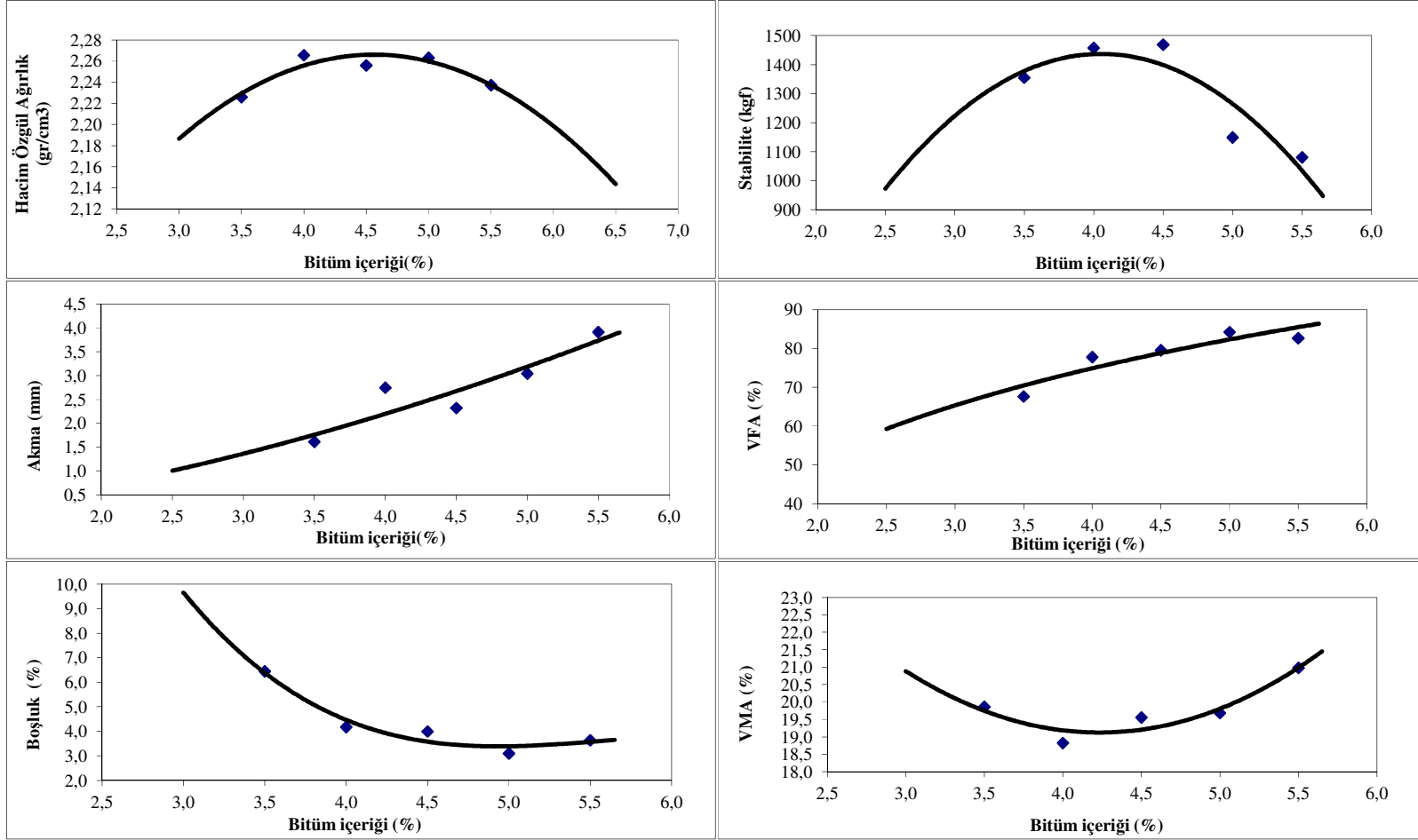
Numune No,	Bitüm %		Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düz. Fakt.	Düz. Stab.
	Wa	Wb	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%	mm	kgf		kgf
1	4,0	3,8	66,74	66,86	67,00	66,9	1180,0	662,0	1192,0	530,0	2,226	2,3697	6,047	16,38	63,1	2,02	1240	0,925	1147
2	4,0	3,8	66,62	66,34	65,82	66,3	1177,0	663,5	1189,5	526,0	2,238	2,3697	5,57	15,95	65,1	2,77	1287	0,938	1207
3	4,0	3,8	65,16	65,28	65,52	65,3	1176,0	664,5	1188,5	524,0	2,244	2,3697	5,293	15,70	66,3	1,85	1246	0,956	1191
Ort.											2,236		5,638	16,01	64,8	2,21			1182
1	4,5	4,3	66,26	66,00	66,18	66,1	1183,5	662,0	1191,0	529,0	2,237	2,3550	5,001	16,37	69,4	2,69	1392	0,941	1310
2	4,5	4,3	65,00	65,06	65,20	65,1	1180,5	665,0	1189,5	524,5	2,251	2,3550	4,429	15,87	72,1	2,18	1374	0,960	1319
3	4,5	4,3	66,00	65,64	65,90	65,8	1181,5	663,0	1189,0	526,0	2,246	2,3550	4,621	16,04	71,2	2,14	1380	0,947	1307
Ort.											2,245		4,684	16,09	70,9	2,34			1312
1	5,0	4,8	65,62	66,00	65,60	65,7	1189,5	678,0	1207,5	529,5	2,246	2,3407	4,025	16,43	75,5	2,08	1329	0,949	1261
2	5,0	4,8	65,70	65,72	65,70	65,7	1198,0	679,5	1213,5	534,0	2,243	2,3407	4,153	16,54	74,9	2,31	1354	0,949	1285
3	5,0	4,8	64,64	64,78	64,62	64,7	1183,5	672,0	1198,5	526,5	2,248	2,3407	3,965	16,37	75,8	2,06	1394	0,970	1352
Ort.											2,246		4,048	16,45	75,4	2,15			1299
1	5,5	5,2	64,14	64,44	64,42	64,3	1200,0	688,5	1224,5	536,0	2,239	2,3266	3,774	17,11	77,9	2,14	1219	0,980	1195
2	5,5	5,2	65,00	65,00	65,28	65,1	1200,0	681,5	1218,0	536,5	2,237	2,3266	3,863	17,18	77,5	2,65	1172	0,960	1125
3	5,5	5,2	64,66	64,30	64,52	64,5	1196,0	682,5	1217,5	535,0	2,236	2,3266	3,915	17,23	77,3	3,46	1177	0,975	1148
Ort.											2,237		3,851	17,17	77,6	2,75			1156



Şeki A.1 Saf bitüm için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.2 Sasobit® katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

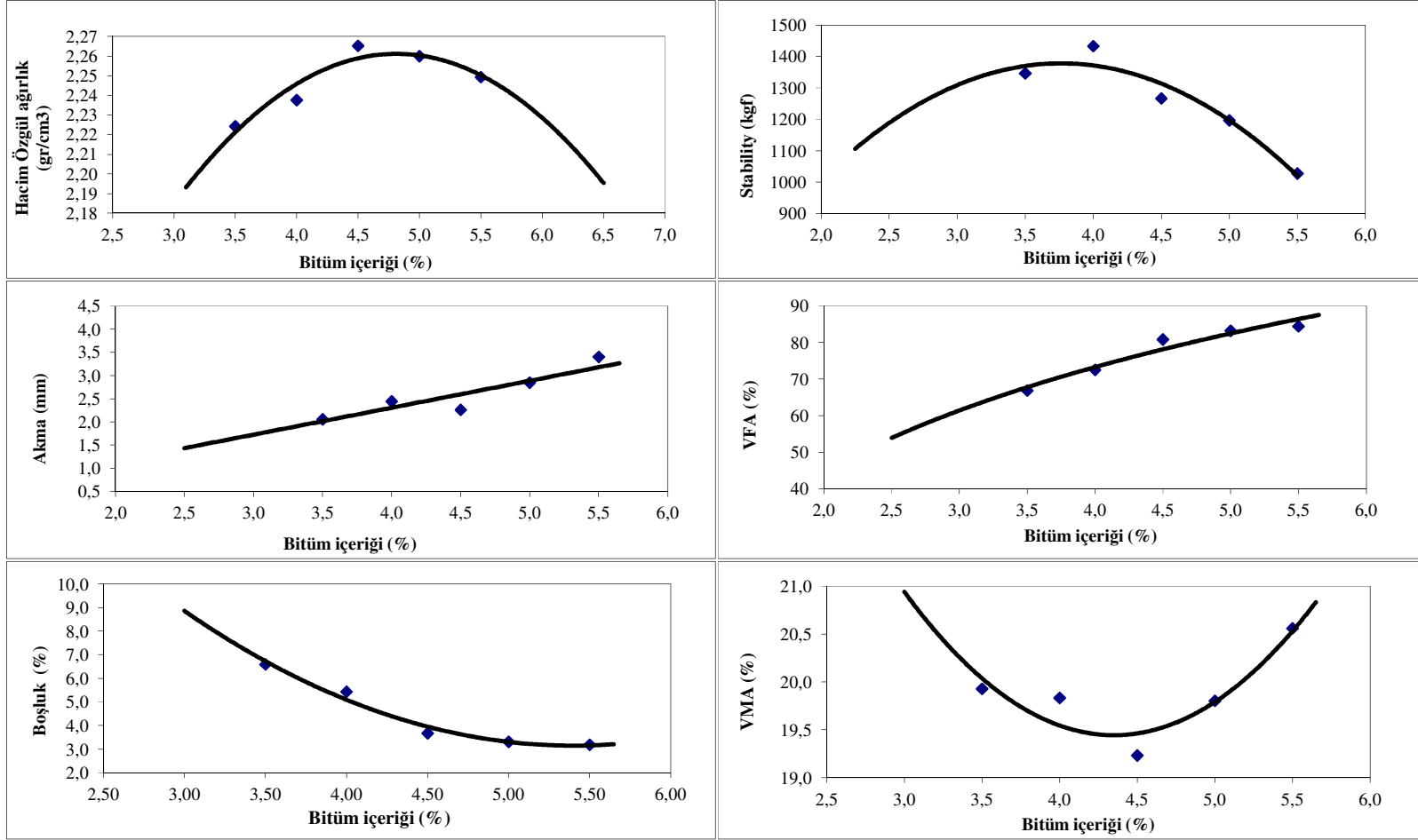
Numune No,	Bitüm %		Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düz. Fakt.	Düz. Stab.
	Wa	Wb	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%	mm	kgf		kgf
1	3,5	3,4	66,60	66,40	66,54	66,5	1167,0	654,0	1185,5	531,5	2,196	2,3796	7,730	20,96	63,1	1,73	1427	0,934	1333
2	3,5	3,4	65,40	65,42	65,34	65,4	1171,5	660,0	1182,0	522,0	2,244	2,3796	5,689	19,21	70,4	1,55	1438	0,954	1372
3	3,5	3,4	65,80	65,60	65,28	65,6	1169,5	659,0	1181,5	522,5	2,238	2,3796	5,940	19,43	69,4	1,57	1432	0,951	1362
Ort.											2,226		6,453	19,87	67,6	1,6			1356
1	4,0	3,8	64,72	64,52	64,66	64,6	1176,0	665,0	1183,0	518,0	2,270	2,3647	3,994	18,67	78,6	2,93	1525	0,973	1484
2	4,0	3,8	65,38	65,22	65,50	65,4	1174,0	663,0	1180,0	517,0	2,271	2,3647	3,972	18,65	78,7	2,56	1503	0,954	1434
3	4,0	3,8	65,82	65,74	65,52	65,7	1175,5	662,5	1183,5	521,0	2,256	2,3647	4,588	19,17	76,1	2,76	1535	0,949	1457
Ort.											2,266		4,185	18,83	77,8	2,8			1458
1	4,5	4,3	65,30	65,28	65,22	65,3	1175,5	666,5	1188,0	521,5	2,254	2,3502	4,088	19,63	79,2	2,45	1547	0,956	1479
2	4,5	4,3	65,26	65,42	65,20	65,3	1172,5	664,0	1185,0	521,0	2,250	2,3502	4,241	19,76	78,5	2,31	1518	0,956	1451
3	4,5	4,3	65,66	65,62	65,64	65,6	1176,0	669,0	1188,5	519,5	2,264	2,3502	3,678	19,29	80,9	2,21	1554	0,951	1478
Ort.											2,256		4,002	19,56	79,6	2,3			1469
1	5,0	4,8	65,42	65,44	65,48	65,4	1175,0	659,5	1179,0	519,5	2,262	2,3359	3,173	19,74	83,9	2,97	1183	0,954	1129
2	5,0	4,8	65,52	65,52	65,52	65,5	1176,5	660,0	1179,5	519,5	2,265	2,3359	3,049	19,64	84,5	3,15	1220	0,953	1163
3	5,0	4,8	65,54	65,56	65,54	65,5	1177,0	662,0	1182,0	520,0	2,263	2,3359	3,101	19,68	84,2	3,02	1214	0,953	1157
Ort.											2,263		3,107	19,69	84,2	3,0			1149
1	5,5	5,2	65,80	65,76	65,42	65,7	1172,0	665,5	1187,0	521,5	2,247	2,3219	3,212	20,63	84,4	4,12	1118	0,949	1061
2	5,5	5,2	65,42	65,20	65,38	65,3	1172,5	660,5	1186,0	525,5	2,231	2,3219	3,908	21,20	81,6	3,68	1125	0,956	1076
3	5,5	5,2	65,62	65,64	65,82	65,7	1176,0	658,5	1185,0	526,5	2,234	2,3219	3,804	21,12	82,0	3,95	1165	0,949	1106
Ort.											2,237		3,641	20,99	82,7	3,9			1081



Şeki A.2 Sasobit® katkı karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.3 Rediset® katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

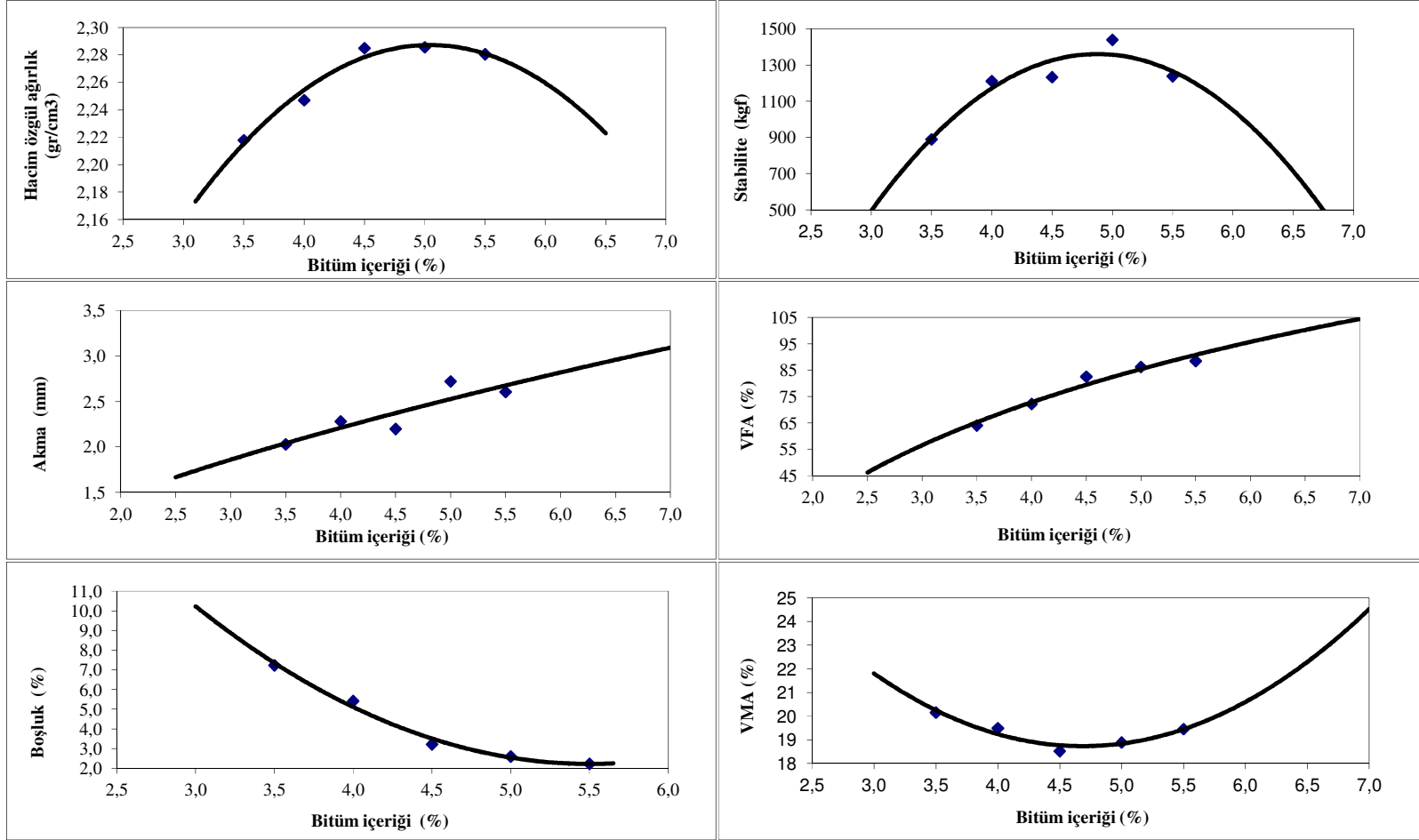
Numune No,	Bitüm %		Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düz. Fakt.	Düz. Stab.
	Wa	Wb	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%	mm	kgf		kgf
1	3,5	3,4	66,10	66,00	66,10	66,1	1174,0	661,0	1189,0	528,0	2,223	2,3814	6,630	19,96	66,8	2,08	1435	0,941	1350
2	3,5	3,4	65,90	65,82	65,84	65,9	1164,0	653,0	1177,5	524,5	2,219	2,3814	6,808	20,11	66,1	2,05	1440	0,945	1361
3	3,5	3,4	66,76	66,48	66,20	66,5	1177,5	663,5	1191,5	528,0	2,230	2,3814	6,352	19,72	67,8	2,05	1423	0,934	1329
Ort.											2,224		6,597	19,93	66,9	2,1			1347
1	4,0	3,8	67,50	66,78	66,92	67,1	1180,5	659,5	1187,5	528,0	2,236	2,3665	5,521	19,90	72,3	2,43	1567	0,920	1442
2	4,0	3,8	65,10	65,08	65,00	65,1	1179,5	658,5	1184,5	526,0	2,242	2,3665	5,242	19,67	73,3	2,40	1490	0,960	1430
3	4,0	3,8	65,42	65,40	65,48	65,4	1180,0	661,5	1189,5	528,0	2,235	2,3665	5,561	19,94	72,1	2,51	1497	0,954	1428
Ort.											2,238		5,442	19,84	72,6	2,4			1433
1	4,5	4,3	66,00	65,78	65,66	65,8	1187,5	668,5	1193,0	524,5	2,264	2,3519	3,733	19,28	80,6	2,15	1353	0,947	1281
2	4,5	4,3	66,10	65,92	65,88	66,0	1195,0	676,5	1204,0	527,5	2,265	2,3519	3,676	19,23	80,9	2,36	1327	0,943	1251
3	4,5	4,3	65,62	65,50	65,68	65,6	1191,0	671,0	1196,5	525,5	2,266	2,3519	3,633	19,19	81,1	2,28	1334	0,951	1269
Ort.											2,265		3,681	19,23	80,9	2,3			1267
1	5,0	4,8	65,30	65,28	65,64	65,4	1190,5	673,5	1200,5	527,0	2,259	2,3376	3,361	19,84	83,1	2,89	1246	0,954	1189
2	5,0	4,8	65,00	65,00	64,82	64,9	1193,0	679,0	1207,0	528,0	2,259	2,3376	3,341	19,83	83,1	2,84	1248	0,967	1207
3	5,0	4,8	65,28	65,30	65,52	65,4	1188,5	672,5	1198,0	525,5	2,262	2,3376	3,248	19,75	83,6	2,82	1252	0,954	1194
Ort.											2,260		3,316	19,81	83,3	2,9			1197
1	5,5	5,2	65,12	65,14	64,80	65,0	1195,5	679,5	1211,0	531,5	2,249	2,3236	3,197	20,57	84,5	3,61	1097	0,963	1056
2	5,5	5,2	65,28	65,20	65,00	65,2	1202,0	683,5	1218,0	534,5	2,249	2,3236	3,217	20,58	84,4	3,45	1038	0,958	994
3	5,5	5,2	65,78	65,48	65,52	65,6	1197,0	681,0	1213,0	532,0	2,250	2,3236	3,167	20,54	84,6	3,16	1086	0,951	1033
Ort.											2,249		3,194	20,56	84,5	3,4			1028



Şekil A.Rediset® katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.4 Advera® katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

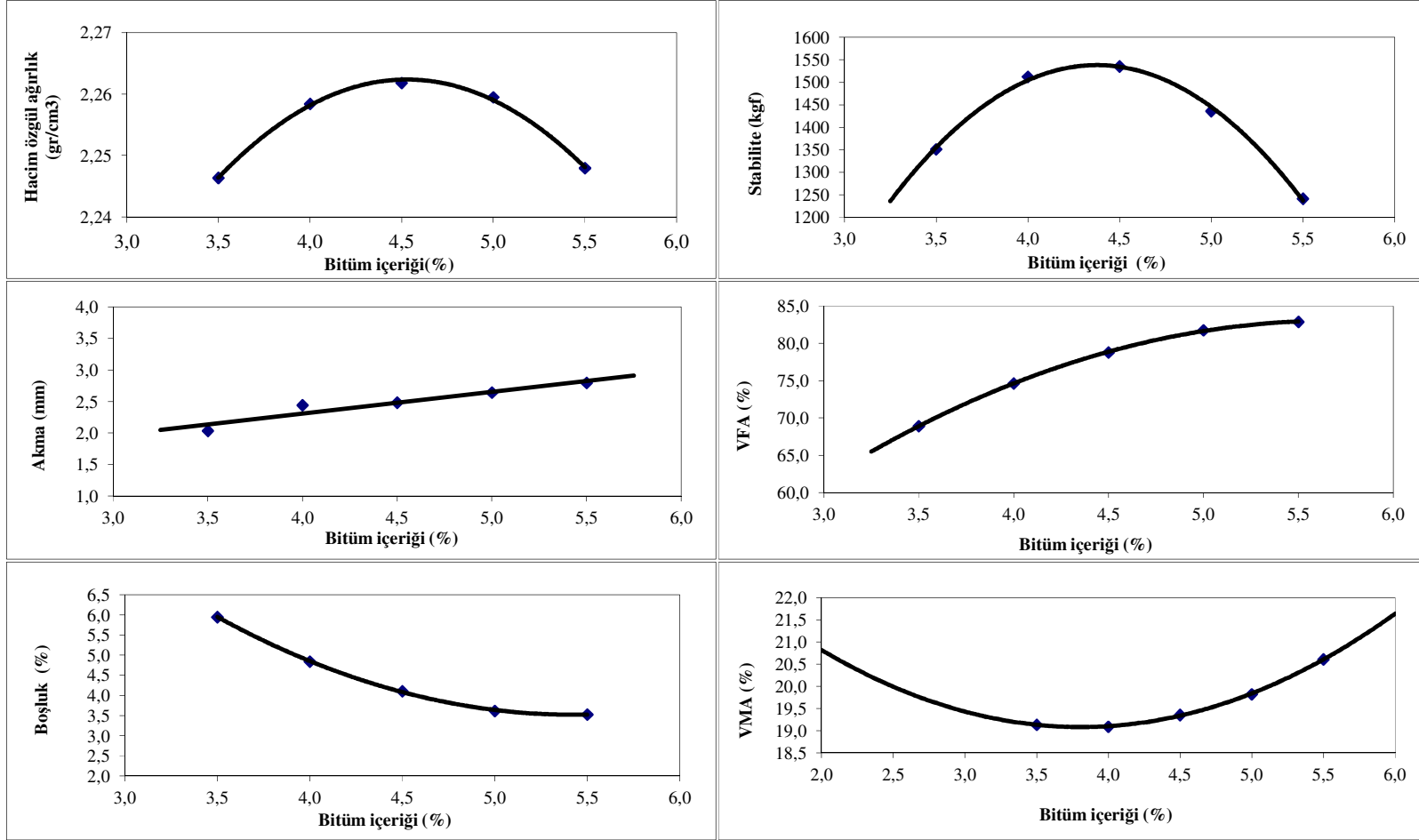
Numune No,	Bitüm %		Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düz. Fakt.	Düz. Stab.
	Wa	Wb	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%	mm	kgf		kgf
1	3,5	3,4	65,48	65,46	65,58	65,5	1174,3	659,2	1188,2	529,0	2,220	2,3911	7,160	20,09	64,4	2,39	960	0,953	915
2	3,5	3,4	65,30	65,38	65,42	65,4	1174,0	662,3	1191,9	529,6	2,217	2,3911	7,289	20,20	63,9	1,87	997	0,954	951
3	3,5	3,4	65,36	65,44	65,40	65,4	1172,2	660,5	1189,2	528,7	2,217	2,3911	7,274	20,19	64,0	1,83	843	0,954	804
Ort.											2,218		7,241	20,16	64,1	2,03			890
1	4,0	3,8	65,84	65,72	65,86	65,8	1180,4	666,2	1189,6	523,4	2,255	2,3760	5,080	19,21	73,5	1,95	1345	0,947	1274
2	4,0	3,8	66,52	66,32	66,78	66,5	1178,4	663,4	1192,8	529,4	2,226	2,3760	6,315	20,26	68,8	2,39	1251	0,934	1168
3	4,0	3,8	65,36	65,22	65,56	65,4	1174,8	662,3	1182,1	519,8	2,260	2,3760	4,876	19,03	74,4	2,51	1250	0,954	1193
Ort.											2,247		5,424	19,50	72,3	2,28			1212
1	4,5	4,3	64,52	64,78	64,56	64,6	1179,4	666,4	1183,4	517,0	2,281	2,3612	3,386	18,67	81,9	2,16	1256	0,973	1222
2	4,5	4,3	64,40	65,42	64,52	64,8	1180,3	668,1	1184,2	516,1	2,287	2,3612	3,144	18,46	83,0	2,20	1272	0,968	1231
3	4,5	4,3	64,38	64,76	64,40	64,5	1185,1	669,6	1187,8	518,2	2,287	2,3612	3,144	18,46	83,0	2,24	1278	0,975	1246
Ort.											2,285		3,225	18,53	82,6	2,20			1233
1	5,0	4,8	64,82	64,88	64,92	64,9	1190,5	671,5	1193,4	521,9	2,281	2,3468	2,798	19,06	85,3	2,64	1452	0,966	1403
2	5,0	4,8	64,04	64,26	64,54	64,3	1188,7	674,9	1190,9	516,0	2,304	2,3468	1,835	18,26	89,9	2,87	1540	0,98	1509
3	5,0	4,8	64,62	64,70	64,68	64,7	1186,4	669,1	1191,2	522,1	2,272	2,3468	3,170	19,37	83,6	2,66	1450	0,97	1407
Ort.											2,286		2,601	18,89	86,3	2,72			1439
1	5,5	5,2	63,78	63,74	63,88	63,8	1196,9	676,9	1200,7	523,8	2,285	2,3326	2,040	19,30	89,4	2,62	1258	0,993	1249
2	5,5	5,2	63,86	64,00	63,90	63,9	1191,3	671,5	1194,2	522,7	2,279	2,3326	2,293	19,51	88,2	2,58	1250	0,990	1238
3	5,5	5,2	64,10	64,28	64,22	64,2	1193,7	673,1	1197,2	524,1	2,278	2,3326	2,358	19,56	87,9	2,62	1251	0,983	1230
Ort.											2,281		2,230	19,46	88,5	2,61			1239



Şekil A.5 Advera[®] katkı karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.5 Doğal zeolit katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

Numune No,	Bitüm %		Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düz. Fakt.	Düz. Stab.
	Wa	Wb	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%	mm	kgf		kgf
1	3,5	3,4	65,80	65,40	65,42	65,5	1179,5	670,5	1196,5	526,0	2,242	2,3884	6,114	19,28	68,3	1,98	1417	0,953	1350
2	3,5	3,4	65,22	65,38	65,66	65,4	1179,0	671,5	1195,5	524,0	2,250	2,3884	5,795	19,00	69,5	2,10	1409	0,954	1344
3	3,5	3,4	65,18	65,30	65,28	65,3	1179,5	670,0	1195,0	525,0	2,247	2,3884	5,935	19,12	69,0	2,03	1421	0,956	1358
Ort.											2,246		5,948	19,14	68,9	2,04			1351
1	4,0	3,8	65,80	65,76	65,46	65,7	1187,0	675,5	1201,5	526,0	2,257	2,3734	4,918	19,16	74,3	2,35	1575	0,949	1495
2	4,0	3,8	65,46	66,00	65,82	65,8	1188,0	676,0	1202,0	526,0	2,259	2,3734	4,838	19,09	74,7	2,47	1600	0,947	1515
3	4,0	3,8	65,10	65,14	65,12	65,1	1186,5	675,5	1200,5	525,0	2,260	2,3734	4,777	19,04	74,9	2,51	1591	0,960	1527
Ort.											2,258		4,844	19,09	74,6	2,44			1512
1	4,5	4,3	65,74	65,92	65,68	65,8	1191,0	678,0	1204,5	526,5	2,262	2,3586	4,093	19,35	78,8	2,55	1610	0,947	1525
2	4,5	4,3	65,62	65,66	65,66	65,6	1189,0	678,0	1204,5	526,5	2,258	2,3586	4,254	19,48	78,2	2,31	1622	0,951	1543
3	4,5	4,3	65,72	65,56	65,58	65,6	1188,0	679,0	1203,5	524,5	2,265	2,3586	3,970	19,24	79,4	2,59	1618	0,951	1539
Ort.											2,262		4,106	19,36	78,8	2,48			1535
1	5,0	4,8	65,12	65,18	65,18	65,2	1180,0	670,5	1193,0	522,5	2,258	2,3442	3,663	19,86	81,6	2,68	1508	0,958	1445
2	5,0	4,8	65,20	65,38	65,32	65,3	1182,5	671,5	1195,5	524,0	2,257	2,3442	3,735	19,92	81,3	2,61	1501	0,956	1435
3	5,0	4,8	65,80	65,46	65,52	65,6	1181,5	672,5	1194,5	522,0	2,263	2,3442	3,448	19,69	82,5	2,64	1502	0,951	1428
Ort.											2,259		3,616	19,83	81,8	2,64			1436
1	5,5	5,2	66,00	65,98	65,88	66,0	1179,5	669,5	1195,5	526,0	2,242	2,3302	3,766	20,81	81,9	2,89	1311	0,943	1236
2	5,5	5,2	65,78	65,80	65,78	65,8	1181,0	673,0	1197,0	524,0	2,254	2,3302	3,276	20,41	83,9	2,74	1309	0,947	1240
3	5,5	5,2	65,62	65,62	65,66	65,6	1184,5	674,0	1201,0	527,0	2,248	2,3302	3,542	20,62	82,8	2,76	1312	0,951	1248
Ort.											2,248		3,528	20,61	82,9	2,80			1241

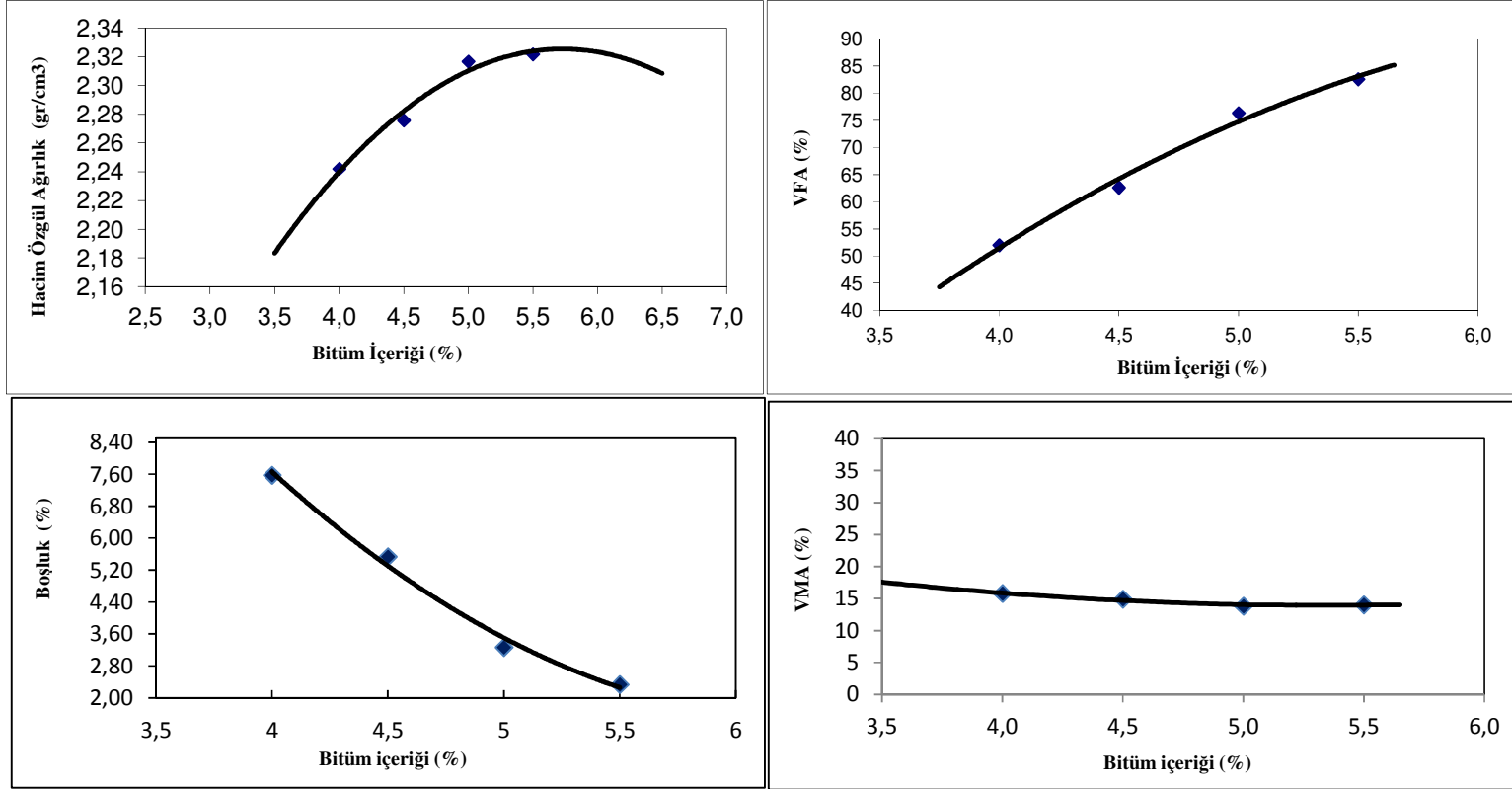


Şekil A.5 Doğal zeolit katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

EK B
SUPERPAVE KARIŞIM TASARIMI

Tablo B.1 Saf bitüm için Superpave karışım tasarımı verileri

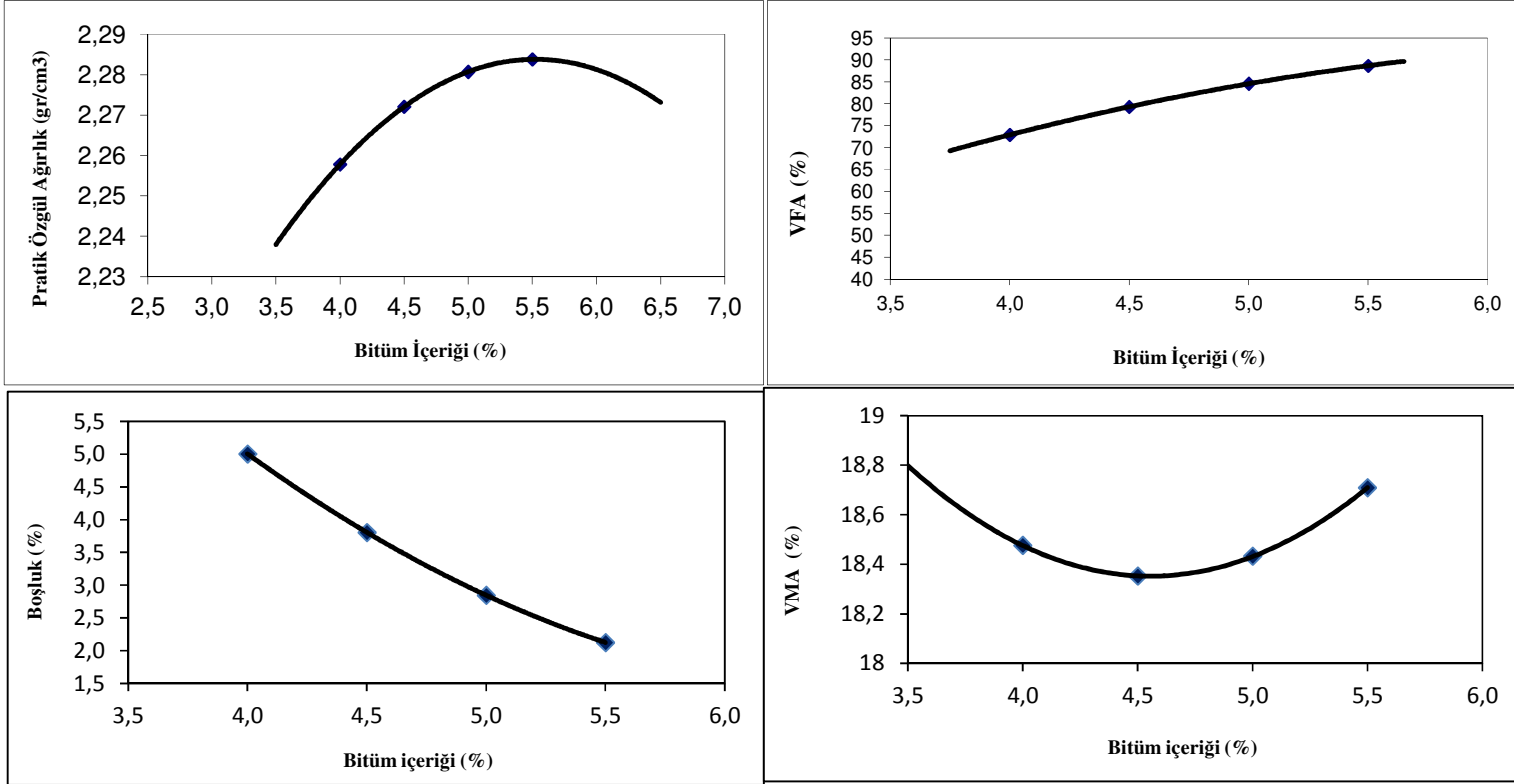
Numune No	Bitüm %		Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA
	Wa	Wb	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%
1	4,0	3,8	1173,3	664,9	1186,2	521,3	2,251	2,4259	7,223	15,46	53,3
2	4,0	3,8	1187,3	661,3	1192,9	531,6	2,233	2,4259	7,935	16,11	50,7
Ort.							2,242		7,58	15,79	52,0
1	4,5	4,3	1191,3	677,2	1201,4	524,2	2,273	2,4103	5,713	15,05	62,0
2	4,5	4,3	1191,9	675,8	1198,8	523,0	2,279	2,4103	5,446	14,81	63,2
Ort.							2,276		5,58	14,93	62,6
1	5,0	4,8	1197,8	681,6	1199,5	517,9	2,313	2,3950	3,433	13,96	75,4
2	5,0	4,8	1193,3	682,5	1196,7	514,2	2,321	2,3950	3,104	13,66	77,3
Ort.							2,317		3,27	13,81	76,3
1	5,5	5,2	1202,3	686,4	1205,1	518,7	2,318	2,3801	2,612	14,18	81,6
2	5,5	5,2	1205,9	689,9	1208,4	518,5	2,326	2,3801	2,283	13,89	83,6
Ort.							2,322		2,45	14,03	82,6



Şekil B.1 Saf bitüm için Superpave karışım tasarımı grafikleri

Tablo B.2 Sasobit® katkılı karışım için Superpave karışım tasarımı verileri

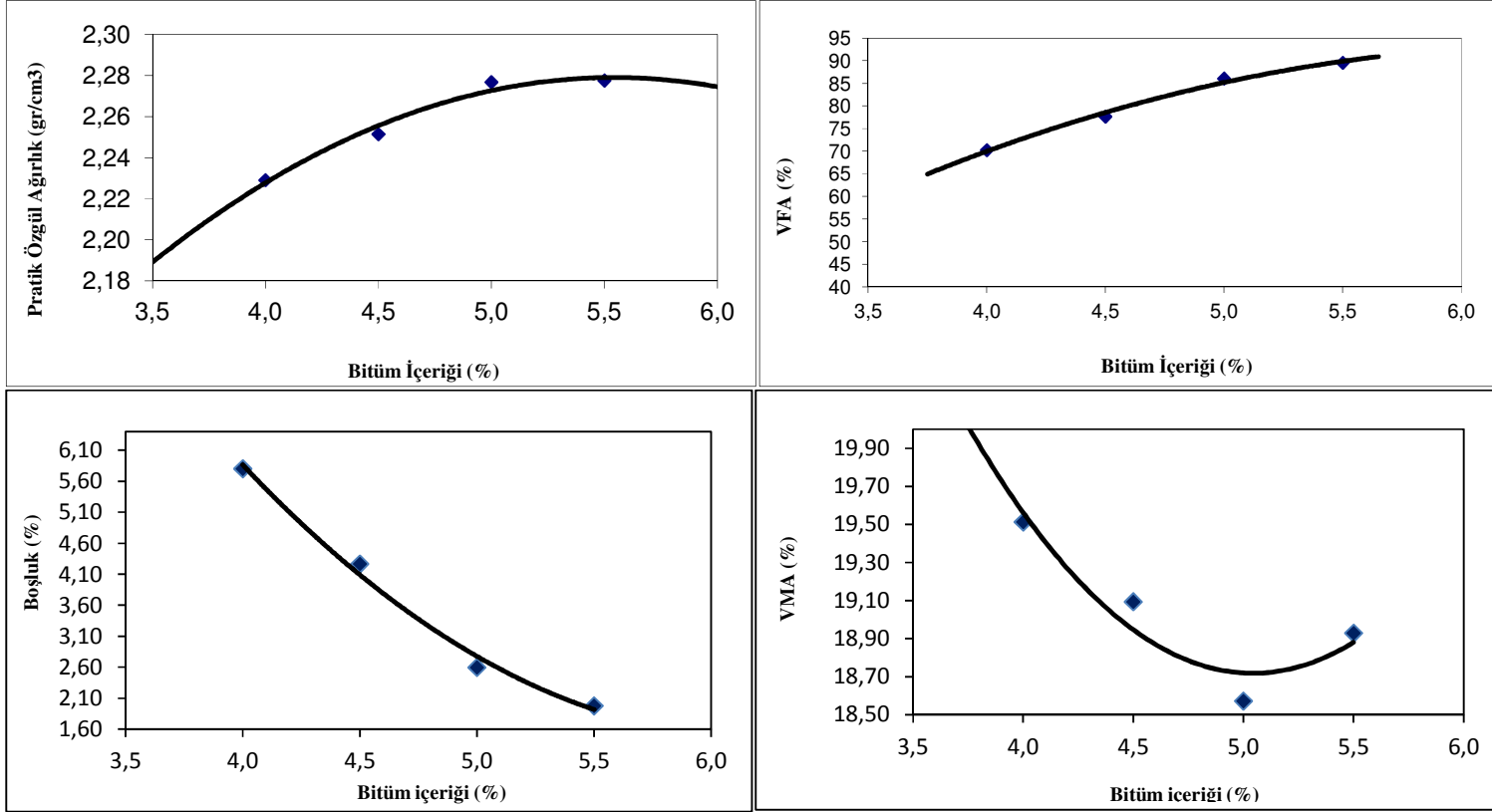
Numune No	Bitüm %		Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA
	Wa	Wb	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%
1	4,0	3,8	1189,2	673,6	1200,8	527,2	2,256	2,3768	5,096	18,55	72,5
2	4,0	3,8	1185,8	672,6	1197,3	524,7	2,260	2,3768	4,917	18,40	73,3
Ort.							2,258		5,01	18,48	72,6
1	4,5	4,3	1200,2	678,5	1207,1	528,6	2,271	2,3620	3,875	18,41	79,0
2	4,5	4,3	1191,2	675,5	1199,4	523,9	2,274	2,3620	3,739	18,29	79,6
Ort.							2,272		3,81	18,35	79,3
1	5,0	4,8	1203,9	677,6	1206,9	529,3	2,275	2,3476	3,113	18,66	83,3
2	5,0	4,8	1199,3	677,4	1201,8	524,4	2,287	2,3476	2,581	18,21	85,8
Ort.							2,281		2,85	18,43	84,6
1	5,5	5,2	1211,8	683,9	1214,1	530,2	2,286	2,3334	2,052	18,65	89,0
2	5,5	5,2	1215,7	685,2	1217,9	532,7	2,282	2,3334	2,198	18,77	88,3
Ort.							2,284		2,13	18,71	88,6



Şekil B.2 Sasobit® katkılı bitüm için Superpave karışım tasarımı grafikleri

Tablo B.3 Rediset® katkılı karışım için Superpave karışım tasarımı verileri

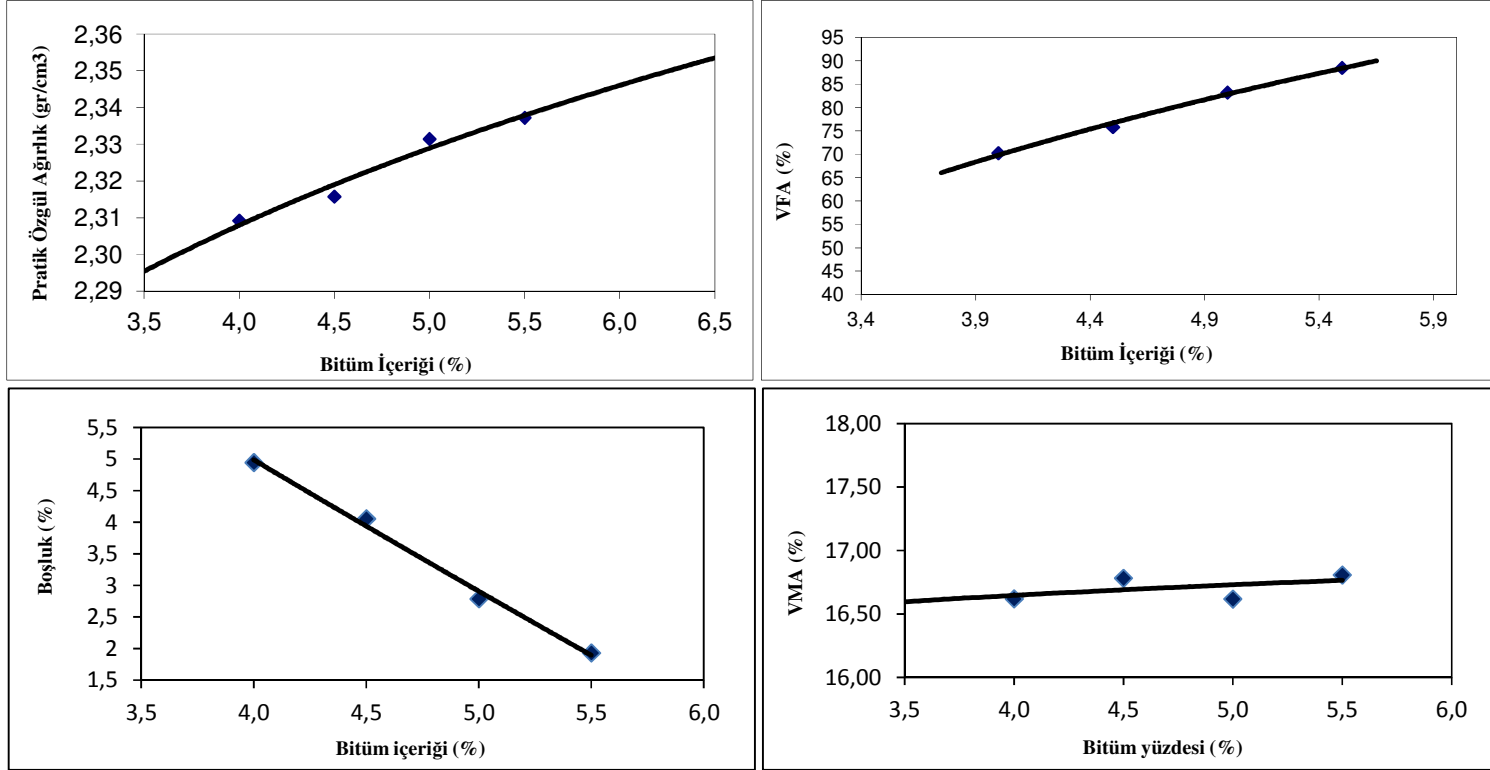
Numune No	Bitüm %		Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA
	Wa	Wb	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%
1	4,0	3,8	1188,1	663,8	1196,8	533,0	2,229	2,3665	5,805	19,51	70,3
2	4,0	3,8	1191,9	665,2	1199,9	534,7	2,229	2,3665	5,804	19,51	70,3
Ort.									5,80	19,51	70,3
1	4,5	4,3	1197,1	672,7	1204,8	532,1	2,250	2,3519	4,341	19,16	77,3
2	4,5	4,3	1198,7	674,2	1206,2	532,0	2,253	2,3519	4,195	19,03	78,0
Ort.									4,27	19,09	77,6
1	5,0	4,8	1198,5	676,9	1200,7	523,8	2,288	2,3376	2,117	18,17	88,4
2	5,0	4,8	1201,9	672,6	1203,1	530,5	2,266	2,3376	3,079	18,97	83,8
Ort.									2,60	18,57	86,1
1	5,5	5,2	1210,6	679,4	1211,2	531,8	2,276	2,3236	2,030	18,97	89,3
2	5,5	5,2	1215,1	683,2	1216,4	533,2	2,279	2,3236	1,924	18,89	89,8
Ort.									1,98	18,93	89,6



Şekil B.3 Rediset® katkı bitüm için Superpave karışım tasarımı grafikleri

Tablo B.4 Advera[®] katkılı karışım için Superpave karışım tasarımı verileri

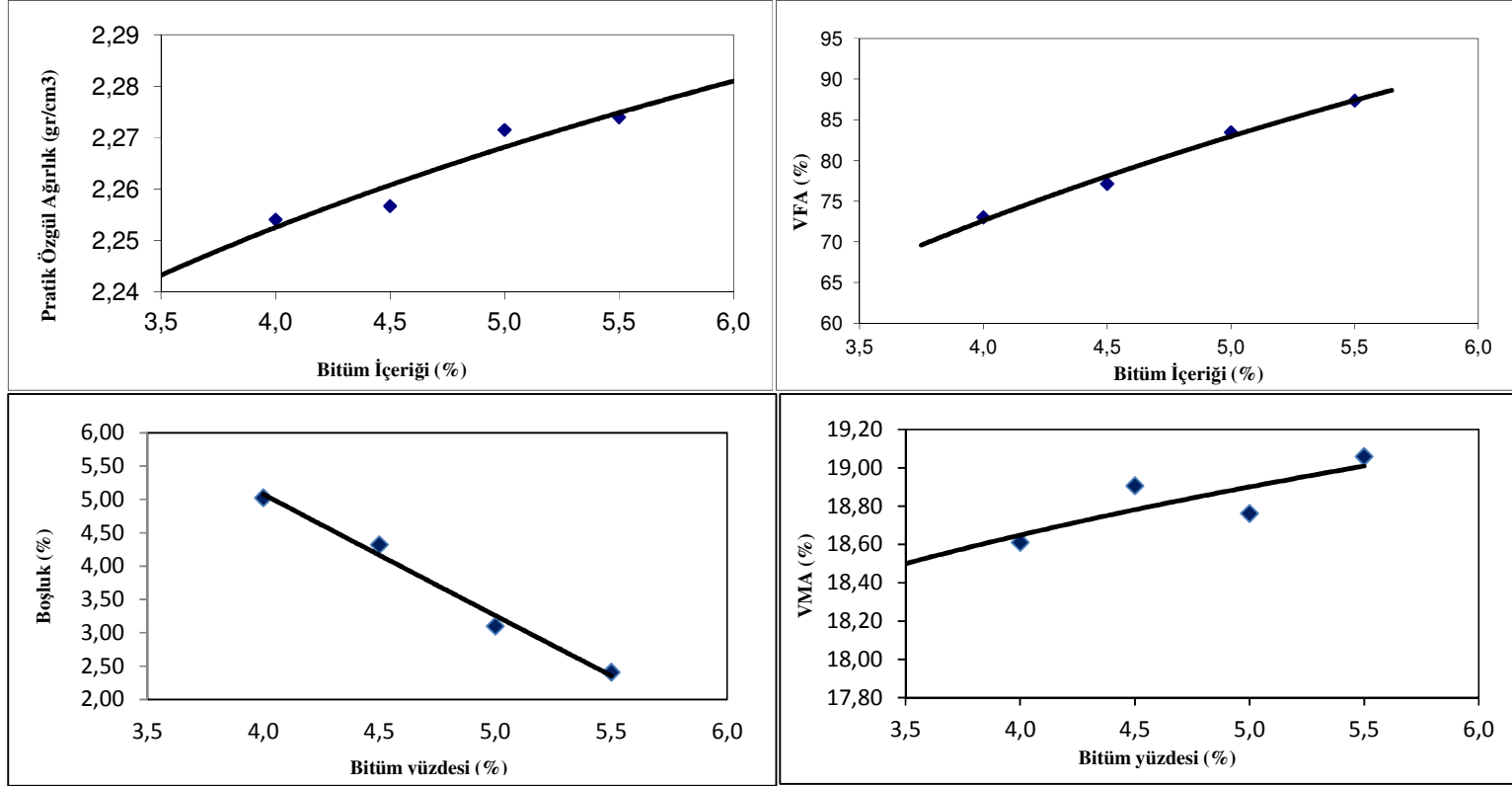
Numune No	Bitüm %		Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA
	Wa	Wb	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	%	%
1	4,0	3,8	1181,4	677,2	1190,7	513,5	2,301	2,4294	5,298	16,93	68,7
2	4,0	3,8	1178,8	678,0	1186,6	508,6	2,318	2,4294	4,596	16,31	71,8
Ort.							2,309		4,95	16,62	70,3
1	4,5	4,3	1195,6	684,3	1200,3	516,0	2,317	2,4137	4,004	16,74	76,1
2	4,5	4,3	1197,3	686,2	1203,5	517,3	2,315	2,4137	4,109	16,83	75,6
Ort.							2,316		4,06	16,78	75,8
1	5,0	4,8	1199,1	686,6	1201,1	514,5	2,331	2,3984	2,825	16,65	83,0
2	5,0	4,8	1194,6	683,9	1196,1	512,2	2,332	2,3984	2,754	16,59	83,4
Ort.							2,331		2,79	16,62	83,2
1	5,5	5,2	1212,6	693,9	1213,1	519,2	2,336	2,3833	2,007	16,87	88,1
2	5,5	5,2	1215,8	696,4	1216,2	519,8	2,339	2,3833	1,862	16,75	88,9
Ort.							2,337		1,93	16,81	88,5



Şekil B.3 Advera® katkıli bitüm için Superpave karışım tasarımı grafikleri

Tablo B.5 Doğal zeolit katkılı karışım için Superpave karışım tasarımı verileri

Numune No	Bitüm %		Havadaki Ağ. (gr.)	Sudaki Ağ. (gr.)	DYKA (gr.)	Hacim	Hacim Özg. Ağ.	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Boşluk (%)	VMA	VFA
	Wa	Wb									
1	4,0	3,8	1193,3	677,8	1209,4	531,6	2,245	2,4294	5,420	18,95	71,4
2	4,0	3,8	1188,3	676,8	1201,8	525,0	2,263	2,4294	4,632	18,27	74,7
Ort.								2,254	5,03	18,61	73,0
1	4,5	4,3	1205,4	684,2	1218,1	533,9	2,258	2,4137	4,279	18,87	77,3
2	4,5	4,3	1199,8	676,7	1208,6	531,9	2,256	2,4137	4,365	18,94	77,0
Ort.								2,257	4,32	18,91	77,1
1	5,0	4,8	1205,2	677,9	1208,4	530,5	2,272	2,3984	3,090	18,75	83,5
2	5,0	4,8	1207,4	680,6	1212,2	531,6	2,271	2,3984	3,114	18,77	83,4
Ort.								2,272	3,10	18,76	83,5
1	5,5	5,2	1208,9	680,3	1210,8	530,5	2,279	2,3833	2,204	18,89	88,3
2	5,5	5,2	1216,3	683,3	1219,3	536,0	2,269	2,3833	2,615	19,23	86,4
Ort.								2,274	2,41	19,06	87,4



Şekil B.3 Doğal zeolit katkılı bitüm için Superpave karışım tasarımı grafikleri