

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTA SICAKLIKTAKİ ASFALT
KARIŞIMLARININ PERFORMANSLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

İsmail Çağrı GÖRKEM

Mart, 2014

İZMİR

**ORTA SICAKLIKTAKİ ASFALT
KARIŞIMLARININ PERFORMANSLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

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

İsmail Çağrı GÖRKEM

Mart, 2014

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

İSMAİL ÇAĞRI GÖRKEM, tarafından DOÇ. DR. BURAK ŞENGÖZ yönetiminde hazırlanan “ORTA SICAKLIKTAKİ ASFALT KARIŞIMLARININ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Burak ŞENGÖZ

Yönetici



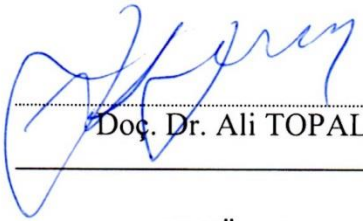
Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER

Tez İzleme Komitesi Üyesi




Doç. Dr. Perviz AHMEDZADE

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Ali TOPAL

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Atakan AKSOY

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca, verdiği kıymetli destek, yol göstericiliği ve tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı, saygı değer hocam Doç. Dr. Burak ŞENGÖZ'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, anabilim dalı hocalarım Doç. Dr. Ali TOPAL ve Doç. Dr. Serhan TANYEL'e desteklerinden ve yapıcı eleştirilerinden dolayı müteşekkirim.

Hayata ve akademik yaşama dair desteğini ve kıymetli önerilerini hiçbir şekilde benden esirgemeyen hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Cumhuriyet AYDIN'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Anabilim dalı laboratuvarımızda deneysel çalışmalarına devam eden arkadaşlarım Peyman AGHAZADEH DOKANDARİ, Amir ONSORİ ve Jülide ÖNER'e destekleri ve arkadaşlıkları için teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, mühendislik eğitimim boyunca kendime rol model olarak benimsediğim babam İnş. Müh. Mithat GÖRKEM'e, değerli annem Meral GÖRKEM'e ve kardeşim Pelin GÖRKEM'e hep yanımda oldukları ve varlıklarıyla beni onurlandırdıkları için en derin teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince 110M567 numara ve "Doğal Zeolit İçeren Ilık Karışım Asfaltların Performansları ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Sonuçların Farklı Ilık Karışım Asfalt Uygulamaları İle Karşılaştırılması" başlıklı TÜBİTAK projesindeki desteklerinden dolayı TÜBİTAK Marmara Araştırma Grubu'na (MAG) teşekkür ederim.

İsmail Çağrı GÖRKEM

ORTA SICAKLIKTAKİ ASFALT KARIŞIMLARININ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Günümüzde artan karayolu ağı ile birlikte artan asfalt üretiminin doğaya verdiği zararlar, araştırmacıları çevreye duyarlı, daha düşük üretim maliyetli ve özellikleri bakımından en az bitümlü sıcak karışımlar (BSK) kadar iyi sonuçlar veren asfalt karışımları üretmeye yöneltmiştir. 1997’de Avustralya’da gündeme getirilen bu konu, 2000 yılında ılık karışım asfaltların (IKA) üretimine öncülük etmiştir. Ilık karışım asfalt üretiminde organik, kimyasal ve köpüklendirme sağlayan çeşitli katkılar bitümün viskozitesini düşürerek düşük sıcaklıklarda bile karışıma giren agregaların tamamen bitüm filmi ile kaplanmasını sağlamaktadır. Karışımın düşük sıcaklıklarda yapılması nedeniyle, enerji tüketiminde ve doğaya salınan zararlı gazlar ile ince partikül miktarında azalma olmakta, karıştırma, nakliye, serme ve sıkıştırma işlemleri sırasında işçiler daha az zarar görmektedir.

Tez kapsamında, farklı karışım oranlarında IKA katkıları ve doğal zeolit ile hazırlanan bitümler üzerinde geleneksel bitüm deneyleri ile dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Farklı katkıları içeren bitümlerle üretilen IKA’ların performanslarını değerlendirmek için hazırlanan numuneler üzerinde stabilite, yorulma, indirekt çekme gerilmesi ve neme karşı duyarlılık deneyleri uygulanmıştır.

Sonuç olarak, IKA’ların BSK’lara göre etkinlikleri belirlenip karşılaştırmalı performans analizleri yapıldıktan sonra, sıcak karışımlara göre IKA üretiminden elde edilecek ekonomik ve çevresel faydalar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ilık karışım asfalt, doğal zeolit, reoloji, neme karşı duyarlılık.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF WARM-MIX ASPHALT

ABSTRACT

Today, the production of asphalt has increased with the increase of demands for highway network. However, due to adverse effect of asphalt production on the nature, researchers have tried to explore new kinds of bituminous mixtures that are environmental friendly, cost effective and having at least the same performance of conventional hot mix asphalt (HMA) in terms of properties. This issue has been raised in Australia in 1997 and the studies have then been started in 2000. In the production of warm mix asphalt (WMA), the viscosity of bitumen is reduced by using various organic, chemical additives and foamed techniques leading to cover aggregates completely with bitumen film. The production of the asphalt mixtures at low temperature provides the reduction of energy consumption and greenhouse gas emissions as well as fine particles suspended in the air. By this way, during mixing, hauling, laying and compaction operations occupational health and safety issues could be improved.

Within the scope of thesis, conventional bitumen tests and dynamic shear modulus test have been applied on the bitumen samples prepared with WMA additives. After the determination of the properties of the bitumen samples, mechanical and performance tests such as stability, fatigue, indirect tensile strength, stiffness modulus and moisture susceptibility tests have been performed on the samples.

As a result, the effects of WMA additives and natural zeolite have been tried to be determined by comparing the result with control samples as well as with samples involving WMA additives. In addition, economical and environmental benefits of the WMA production have also been evaluated by comparing with HMA process.

Keywords: Warm mix asphalt, natural zeolite, rheology, moisture susceptibility.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – ASFALT KAPLAMALARDA BOZULMALAR.....	3
2.1 Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi Oluşumu).....	5
2.2 Çatlaklar	8
2.2.1 Yorulma Çatlakları	9
2.2.2 Düşük Sıcaklık Çatlakları	11
2.3 Suya Bağlı Bozulmalar.....	14
2.3.1 Bitümlü Sıcak Karışımların Suya Karşı Duyarlılıklarını Etkileyen Faktörler.....	15
BÖLÜM ÜÇ – MODİFİKASYON	27
3.1 Modifikasyonun Tanımı ve Amacı.....	27
3.2 Modifikasyonu Yöntemleri	29
3.2.1 Bitüm Modifikasyonu	29
3.2.2 Karışım Modifikasyonu	33
3.3 İKA Uygulamaları	34
BÖLÜM DÖRT – İLİK KARIŞIM ASFALT TEKNOLOJİSİ.....	35
4.1 İlık Karışım Asfaltların Tarihçesi.....	35
4.2 İlık Karışım Asfalt (İKA) Katkıların Sınıflandırılması.....	37
4.2.1 Organik İKA Katkıları.....	38

4.2.3 Kimyasal İKA Katkıları.....	41
4.2.4 Köpüklendirme Yöntemleri.....	43
4.3 Ilık Karışım Asfalt (İKA) Katkıların Yararları	49
4.3.1 Çevresel ve Ekonomik Yararları	49
4.3.2 Sıkıştırmaya Yararları.....	51
4.3.3 Nakliye Kolaylığı.....	51
4.3.4 Geri Dönüşüme Katkısı	52
4.3.5 Performansa Etkisi.....	53

BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ALETLER VE DENEY YÖNTEMLERİ 62

5.1 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Aletler.....	62
5.1.1 Geleneksel Bitüm Deneyleri.....	62
5.1.2 Brookfield Dönel Viskozite Deneyi (ASTM D4402/AASHTOTP 48)...	67
5.1.3 Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	69
5.2 Bitümlü Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Aletler	72
5.2.1 Marshall Karışım Tasarımı (ASTM D-1559).....	72
5.2.2 İndirekt Çekme Deneyi.....	74
5.2.3 Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Dirençlerinin Saptanması (AASHTO T283-99).....	75

BÖLÜM ALTI – DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 78

6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	78
6.1.1 Bitüm	78
6.1.2 Agregası.....	79
6.1.3 Ilık Karışım Asfalt Katkıları	80
6.2 Ilık Karışım Asfalt Katkıları ile Bitüm Örneklerinin Hazırlanması.....	86
6.2.1 İKA Katkıları için Üretim Süre ve Sıcaklık Değerlerinin Belirlenmesi... 86	
6.2.2 İKA Katkıları için Agregası ile Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi.....	88
6.3 Deney Sonuçları	92

6.3.1 Bitüm Deneyleri Sonuçları	92
6.4 İlık Karışım Asfalt Deney Sonuçları	116
6.4.1 Her Bir İKA Katkı için Optimum Bitüm Oranı Tayini	116
6.4.2 Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Sonuçları	128
6.4.3 İndirekt Çekme Gerilmesi Deneyi Sonuçları.....	130
6.4.4 Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Dirençlerinin Saptanması (AASHTO T283-99)	131
BÖLÜM YEDİ – İLİK KARIŞIM ASFALTLARDA FAYDA-MALİYET ANALİZİ.....	133
7.1 Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) için Yapılan Örnek Analiz	134
7.2 Organik İKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz	137
7.3 Kimyasal İKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz	141
7.4 Sentetik Zeolit Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz	145
7.5 Doğal Zeolit İKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz	148
BÖLÜM SEKİZ – SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	154
KAYNAKLAR	157

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Bozulmalara bağlı performans.....	4
Şekil 2.2 Zayıf Alttemele bağlı tekerlek izi oluşumu	6
Şekil 2.3 Zayıf karışıma bağlı tekerlek izi oluşumu	7
Şekil 2.4 Tekerlek izi derinliğine bağlı bozulma durumu.....	8
Şekil 2.5 Bitümlü kaplamalarda kritik birim şekil değiştirmeler ve yorulma çatlakları	9
Şekil 2.6 Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplamanın çekme mukavemeti	12
Şekil 2.7 Agreg-a-bitüm-su fazında değme açısı	18
Şekil 2.8 Karışımların hava boşluk içeriklerine bağlı dayanımları.....	24
Şekil 5.1 Penetrasyon deneyi seti.....	62
Şekil 5.2 Yumuşama noktası deneyi cihazı.....	63
Şekil 5.3 İnce film halinde ısıtma deney cihazı	64
Şekil 5.4 Dönel ince film etüv aleti-genel görünüş.....	65
Şekil 5.5 Dönel ince film etüv aleti-iklimlendirme haznesi.....	66
Şekil 5.6 Dönel viskometre deney aleti	67
Şekil 5.7 Karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan viskozite grafığı	69
Şekil 5.8 DSR cihazının salınımlarına ait tam döngü	70
Şekil 5.9 DSR cihazı ve aparatları	71
Şekil 5.10 DSR cihazında bitümün durumu.....	71
Şekil 5.11 İndirekt çekme gerilmesi deneyine ilişkin yükleme şekli.....	74
Şekil 5.12 İndirekt Çekme gerilmesi deneyine ilişkin yük-deformasyon özellikleri. 75	75
Şekil 6.1 İKA katkılara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları grafığı	89
Şekil 6.2 Organik ve kimyasal İKA katkılara ait viskozite grafikleri.....	90
Şekil 6.3 Sentetik ve doğal zeolit İKA katkılara ait viskozite grafikleri	91
Şekil 6.4 Organik İKA katkılu bitüm deneyleri sonuçları	94
Şekil 6.5 Kimyasal İKA katkılu bitüm deneyleri sonuçları	96
Şekil 6.6 Sentetik zeolit katkılu bitüm deneyleri sonuçları	98
Şekil 6.7 Doğal zeolit katkılu bitüm deneyleri sonuçları.....	100

Şekil 6.8 Organik IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)..	107
Şekil 6.9 Organik IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz).....	107
Şekil 6.10 Kimyasal IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)	108
Şekil 6.11 Kimyasal IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz).	108
Şekil 6.12 Sentetik zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)	109
Şekil 6.13 Sentetik zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz).	109
Şekil 6.14 Doğal Zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz).	110
Şekil 6.15 Doğal Zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz)....	110
Şekil 6.16 Organik IKA katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)	111
Şekil 6.17 Organik IKA katkısına ait MI değerleri (10 Hz)	111
Şekil 6.18 Kimyasal IKA katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)	112
Şekil 6.19 Kimyasal IKA katkısına ait MI değerleri (10 Hz)	112
Şekil 6.20 Sentetik zeolit katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz).....	113
Şekil 6.21 Sentetik zeolit katkısına ait MI değerleri (10 Hz).....	113
Şekil 6.22 Doğal zeolit katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz).....	114
Şekil 6.23 Doğal zeolit katkısına ait MI değerleri (10 Hz).....	114
Şekil 6.24 Saf bitüm ile hazırlanan örnekler için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları	118
Şekil 6.25 Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları	120
Şekil 6.26 Kimyasal IKA katkı ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları.....	122
Şekil 6.27 Sentetik zeolit ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları	124
Şekil 6.28 Doğal zeolit ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları	126
Şekil 6.29 İndirekt çekme gerilmesi deney sonuçları	130
Şekil 6.30 Her bir IKA katkısıyla optimum katkı içeriklerinde hazırlanmış bitümlü karışım örneklerine ait ITS ve TSR değerleri	132

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Bitümlü tabakalarda kalıcı deformasyonu etkileyen faktörler.....	7
Tablo 2.2 Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler	13
Tablo 2.3 Suya karşı duyarlılığı etkileyen faktörler.....	16
Tablo 2.4 Malzeme cinslerine ilişkin yüzey gerilme değerleri	17
Tablo 2.5 Bazı agregaların silika içerikleri	20
Tablo 3.1 Bitüm modifikasyonlarının genel sınıflandırılması	30
Tablo 3.2 Bitümlü karışımların modifikasyonlar yöntemlerine ait genel sınıflandırma	34
Tablo 4.1 İKA katkılara ait genel bilgiler	48
Tablo 4.2 İKA katkılarla hazırlanan bitümlü karışımlardaki emisyon düşüş değerleri	50
Tablo 5.1 DSR deneyinde kullanılan bitümlü bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri.....	69
Tablo 6.1 Saf bitüm üzerine yapılan deney sonuçları	79
Tablo 6.2 Kullanılan kalker ve bazalt agrega karışımının özellikleri	80
Tablo 6.3 Elek çaplarına göre seçilen gradasyon değerleri.....	80
Tablo 6.4 Zeolitin kimyasal yapısı.....	84
Tablo 6.5 Her bir İKA katkısı için üretim süre ve sıcaklıkları.....	87
Tablo 6.6 İKA katkılara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	88
Tablo 6.7 Organik İKA katkısı ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerine uygulanan deneyler	93
Tablo 6.8 Kimyasal İKA katkılı bitüm örnekleri üzerinde uygulanan deneyler.....	95
Tablo 6.9 Sentetik zeolit katkılı bitüm örnekleri üzerinde yapılan deneyler	97
Tablo 6.10 Doğal zeolit katkılı bitüm örnekleri üzerinde yapılan deneyler	99
Tablo 6.11 Organik İKA katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları.....	101
Tablo 6.12 Kimyasal İKA katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları.....	102
Tablo 6.13 Sentetik zeolit katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları.....	103
Tablo 6.14 Doğal zeolit katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları	104
Tablo 6.15 Tüm İKA katkılara ait optimum bitüm içerikleri.....	128

Tablo 6.16 Tüm İKA katkı ve içerikleri ile hazırlanan Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları.....	129
Tablo 7.1 Her bir İKA katkıya ait belirlenen nihai maliyetler	152

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1970’li yıllardan itibaren karayollarına olan talep dünyanın her yerinde hızla artmış, trafik ağırlaşmış, dingil yükleri artmış ve lastik basınçları yükselmiştir. Ayrıca, değişen iklim koşulları da asfalt kaplamalar üzerindeki çevresel etkenlerin önemini ön plana çıkarmıştır. Bu nedenle, saf bitüm ve yoğun gradasyonlu geleneksel bitümlü karışımların ihtiyaca cevap veremediği ve beklenen performansı gösteremediği gözlenmiştir. Bu yetersizlik, esnek üst yapılarda kalıcı deformasyonların (tekerlek izi oluşumu), yorulma ve termal çatlaklar ile suya bağlı bozulmaların hızlanması şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu durumun engellenmesi için yapılan çalışmalar sonucunda, bitüme veya karışıma bitümle uyumlu katkı maddelerinin eklenmesi gündeme gelmiş ve araştırmacılar bu konu üzerine ayrıntılı çalışmalar yapmışlardır.

Kaplamaların özelliklerinin geliştirilmesinde en sık başvurulan yöntemlerden biri de bitüm modifikasyonudur. Bitüm modifikasyonu genel olarak; dolgu maddeleri (taş tozu, kireç, uçucu kül vb.), ekstender (kükürt, lignin), polimer (elastomer, plastomer), fiber (asbest, taş yünü, fiberglas vb.), oksidan (manganez tuzu), antioksidan (kurşun karışımları, karbon vb.) gibi katkı maddeleri kullanılarak yapılmaktadır.

Geleneksel ve özellikle polimer içeren bitümlü sıcak karışımların (BSK) üretim ve sıkıştırma sırasında ihtiyaç duydukları yüksek sıcaklıklar, bir yandan doğaya tamiri oldukça zor zararlar verirken, bir yandan da üretim maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır.

Artan çevre bilinci ve enerjinin verimli kullanımı ihtiyacı, düşük sıcaklıklarda asfalt kaplama uygulamalarının ülkemizde de kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Son yıllarda araştırmacılar, BSK’ların yerini alacak ve en az BSK ile aynı performansı sergileyen, yapım maliyetleri düşük, kaynakları koruyan, çevreye

daha az zararlı ve uygulamada daha verimli yeni bir bitümlü karışım elde etme yolunda çalışmalar yürütmektedirler (Australian Asphalt Pavement Association, 2001). Bu çalışmalarda benimsenen ortak yaklaşım malzemenin üretimi esnasındaki sıcaklığın düşürülmesidir (Newcomb, 2007). Üretim sırasında ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıkların meydana getirdiği çevresel zararların en aza indirgenebilmesi için yapılan çalışmalar sonunda, 2000 yılında düzenlenen Alman Bitüm Forumu'nda karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında 10–50 °C'lık bir düşüş sağlayan orta sıcaklıktaki asfalt karışımlar fikri benimsenmiştir (Alman Bitüm Forumu, 2000). Ortaya çıkan bu yeni teknoloji ılık karışım asfalt olarak tariflendiğinden, tez kapsamında bu terim kullanılacak olup, "IKA" kısaltması ile kullanılacaktır. IKA katkıları kullanılarak elde edilen karışımlarda temel prensip, viskozitenin düşürülerek düşük sıcaklıklarda bile karışıma giren agregaların tamamen bitüm ile kaplanması ve gerekli stabilite değerlerinin sağlanmasıdır. Bu amaçla tez kapsamında, öncelikle farklı IKA üretim yöntemleri ve kullanılan katkı türlerinin (organik, kimyasal ve sentetik) bitüm içerisindeki performansı değerlendirilecek ve karışım deneyleri yapılacaktır.

IKA üretiminde Avustralya ve Avrupa'da sentetik zeolit yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde bilinen 50 milyar ton rezervi bulunan doğal zeolitin IKA üretiminde sentetik zeolite alternatif olarak kullanılabilmesi öngörülmektedir. Bu amaçla Manisa/Gördes zeolit ocaklarından temin edilen doğal zeolit kullanılarak tez kapsamında özgün bir boyut ortaya konulması hedeflenmiştir.

Dünya genelinde henüz yeni sayılan bu çalışma alanında, ülkemizde uygulanan sıcak asfalt karışımlarına ılık karışım asfalt katkıları ile alternatif yeni bir bakış açısı getirilerek, ayrıntılı performans analizleri ve ekonomik değerlendirmeler yapılması düşünülmektedir.

BÖLÜM İKİ

ASFALT KAPLAMALARDA BOZULMALAR

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak karayollarındaki taşıt ve yük miktarındaki artış ile çevresel etkenler, yolların servis kabiliyetinin azalmasına ve esnek üst yapılarda bozulmalara neden olmaktadır. Bu durum emniyet, konfor ve ekonomi açısından büyük sorunlara yol açmaktadır. Yolun servis ömrünü uzatmanın tek yolu, yeterli düzeyde ve sürekli bakım yaparak, yol üstyapısının dayanımını onarım yöntemleri ile yükseltmektir. Uygun bakım ve onarım yöntemlerinin seçimi, bozulmanın türü ve derecesine göre seçilmelidir.

Genel olarak, esnek üstyapılardaki bozulmalar aşağıdaki beş nedene bağlıdır (Uluçaylı, 1976; Tunç, 2001):

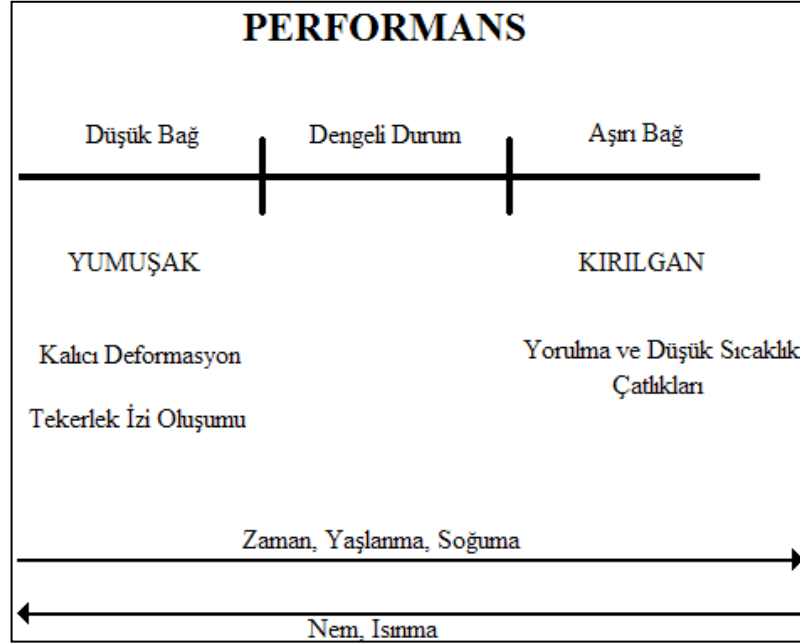
- Trafik tahmininin uygun yapılmaması,
- Tasarım ve yapım hatalarının etkisi,
- Malzemenin yanlış seçimi,
- İklim ve çevre etkisi,
- Yolu kullanım hataları.

Jones (1999)'a göre esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmalar, yoldan beklenen performans düzeyini düşürerek, kaplamanın servis ömrünü azaltmaktadır.

Esnek üstyapılarda bozulmalar dört ana gruba ayrılmaktadır (SHRP A-417, 1994):

- Kalıcı deformasyonlar,
- Yorulma çatlakları,
- Düşük sıcaklık çatlakları,
- Suya bağlı bozulmalar.

Jones (1999) esnek üstyapılarda yumuşak ya da sert bağlayıcıların kullanılması halinde meydana gelen bozulma türleri ile zaman, sıcaklık ve oksidasyonun performans üzerindeki etkilerini Şekil 2.1'deki gibi tanımlamıştır.



Şekil 2.1 Bozulmalara bağlı performans

Brown (2001) SHRP'in sınıflandırmasından farklı olarak, bitümlü bağlayıcının yaşlanması olayını genel sınıflandırmanın dışında tutarak, bozulmaları üç bölümde incelemiştir:

1- Kalıcı Deformasyon

- Tekerlek izi
- Çökmeler
- Kabarmalar
- Yığılmalar
- Ondülasyon

2- Çatlaklar

- Yorulma Çatlakları
- Düşük Sıcaklık Çatlakları

3- Suya Bağlı Bozulmalar

Günümüzde en yaygın bozulma sınıflandırması Brown'a ait olan çalışmadır (Şengöz, 2003). Bu bağlamda, tez kapsamında bahsi geçen bozulma sınıflandırılması kullanılacaktır.

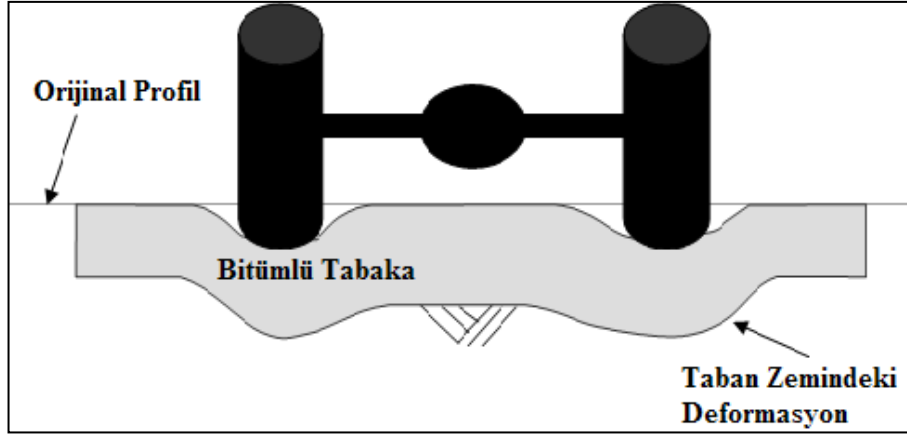
2.1 Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi Oluşumu)

Tekerlek izi oluşumu (rutting), bitümlü kaplamalarda en sık görülen ve gerek teknik, gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bir bozulma tipidir. Kalıcı deformasyon, yol yüzeyine etkiyen yükün her bir uygulandığında, geri dönüşü olmayan küçük miktardaki deformasyonların yığılması biçiminde tanımlanmaktadır (Topal, 2001).

Bu tip deformasyonlar, özellikle arızalı araziye sahip, trafiği ağır ve sıcak ülkelerde problem olmaktadır. Türkiye'yi de bu ülkelerden biri saymak yanlış olmaz. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir bölümünde ya da sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğmaktadır. Kalıcı deformasyonların genellikle iki ana sebebi vardır. Bunlar:

- Alt tabakalara bağlı nedenler
- Bitümlü tabakalara bağlı nedenler

Alt tabakalara bağlı tekerlek izi oluşumu, bitümlü tabakanın altındaki temel veya alt temel tabakalarında çok fazla tekrar eden gerilmeler sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.2).

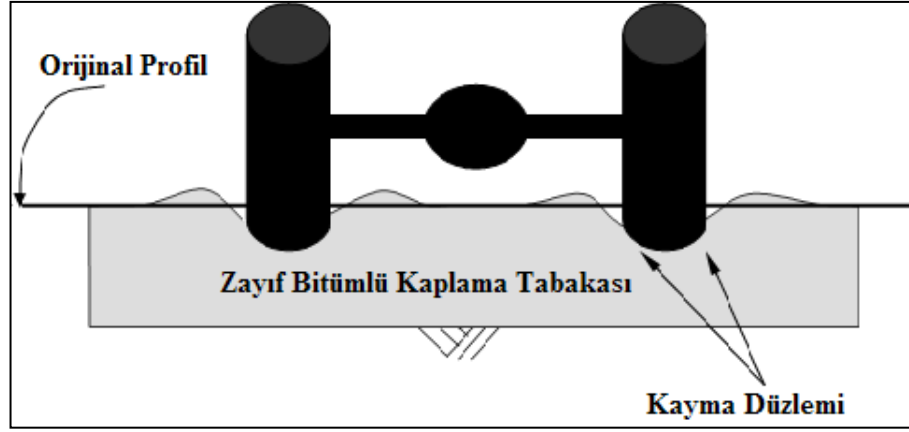


Şekil 2.2 Zayıf Alttemele bağlı tekerlek izi oluşumu (Asphalt Institute, 1996)

Temel ve alt temelde sert malzemelerin kullanımı kısmen alt tabakalara bağlı deformasyonu azaltsa da, bu durum malzemeye bağlı bozulmadan çok, yapısal bir bozulma olarak kabul edilmektedir ve geniş tekerlek izleri oluşmaktadır. Kaplama tabakasının nemden dolayı oluşan beklenmedik zayıflaması bu tip bozulmaları oluşturabilmektedir. Genel olarak alt tabakalara bağlı bozulma sebepleri; alt tabaka kalınlıklarının yetersiz olmasına veya taban zemininin konsolidasyonuna bağlıdır (Asphalt Institute, 1996).

Yüke bağlı gerilmelerin, kaplamayı oluşturan malzemelerin eşik stabilitelerini aşmasına bağlı olarak bitümlü tabakanın tek başına çökmesi, bitümlü tabakalara bağlı deformasyonu oluşturmaktadır. Bu tip bozulmalarda, tekerlek izi genişliği, diğer bozulmaya oranla fazla değildir, ancak kenarlara doğru tümsekler oluşmaktadır (Şekil 2.3)

Bitümlü tabakalara bağlı bozulmalar genellikle yüksek kaplama sıcakları altında, bitümlü kaplamanın yüzeyinde oluşmaktadır. Bu, tekerlek izi oluşumunun sadece bitümlü bağlayıcı sorunu olarak düşünülmesine neden olsa da, aslında sorun bağlayıcı ile mineral agreganın birlikte davranışı olarak incelenmelidir (Asphalt Institute, 1996).



Şekil 2.3 Zayıf karışıma bağlı tekerlek izi oluşumu (Asphalt Institute, 1996)

Bozulmalar kavşak girişlerinde, otobüs duraklarında, ağır taşıtların hız kestiği virajlarda ve dik eğimli yollarda görülmektedir (Verstraeten, 1994).

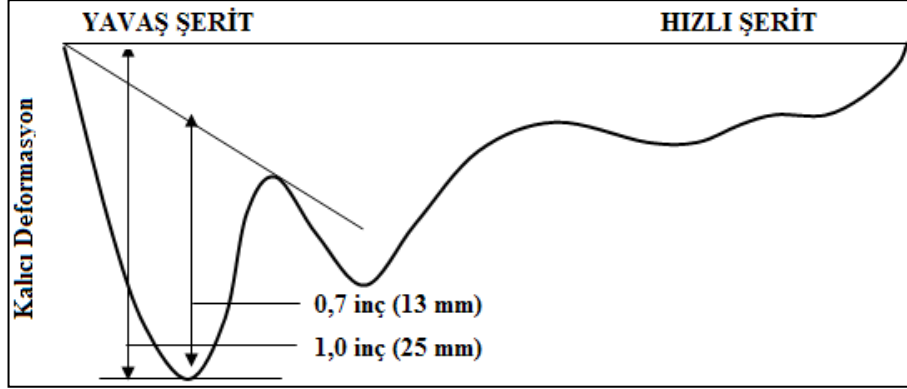
Tekerlek izi oluşumunu etkileyen sıcak karışım özellikleri ve yol koşulları Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1 Bitümlü tabakalarda kalıcı deformasyonu etkileyen faktörler (SHRP A-415, 1994)

	Faktör	Faktörde Değişme	Kalıcı Deformasyona Gösterilen Direnç
Agrega	Yüzey yapısı	Düzgünden pürüzlüye	Artma
	Gradasyon	Boşluklu gradasyondan sürekli gradasyona	Artma
	Şekil	Yuvarlaktan köşeliye	Artma
	Boyut	Maksimum dane boyutunda artış	Artma
Bağlayıcı	Sertlik	Artma	Artma
Bitümlü Sıcak Karışım	Bağlayıcı içeriği	Artma	Azalma
	Hava boşluk oranı*	Artma	Azalma
	Mineral agregada içindeki boşluk	Artma	Azalma
Yol Koşulları	Sıcaklık	Artma	Azalma
	Gerilme/deformasyon Durumu	Lastik basıncı (değme basıncı) artışı	Azalma
	Yük Tekrarı	Artma	Azalma
	Su	Kuru durumdan nemli duruma	Azalma (eğer karışım suya karşı duyarlı ise)
Trafik Koşulları	Hız	Hızda artma	Artma

*Hava boşluk oranı %3'ten az olduğunda, karışımların tekerlek izi potansiyelleri artmaktadır.

“Tekerlek İzi Derinliği” bir kaplamanın bozulma derecesini yansıtan bir ölçüt olarak birçok ülkede kullanılmaktadır. Derinliğe göre bakım, kaplama ve güçlendirme yöntemi belirlenmektedir. Tekerlek izine göre bozulma değerlendirmesi ülkeden ülkeye değişmektedir. Tekerlek izi derinliği birçok ülkede 1,0 ile 2,5 cm. arasında değişmektedir.



Şekil 2.4 Tekerlek izi derinliğine bağlı bozulma durumu (Uluçaylı, 1976)

Örneğin, İngiltere’de tekerlek izi derinliği, orijinal kaplama yüzeyine göre 1 inç (2,5 cm), veya banket kenarından 2 m uzaklıkta düzgün kenara göre 0,7 inç (1,3 cm) değerine ulaşırsa kaplama bozulmuş kabul edilmektedir (Şekil 2.4) (Uluçaylı, 1976).

Bitümlü bağlayıcıların oksidasyonu, bitümlü kaplamalarda görülen tekerlek izi oluşumunu etkilemektedir. Oksidasyon bağlayıcının gevrekliğini arttıracığından kırılmalar oluşabilecektir. Buna karşın kalıcı deformasyona gösterilen direnç artabilmektedir.

2.2 Çatlaklar

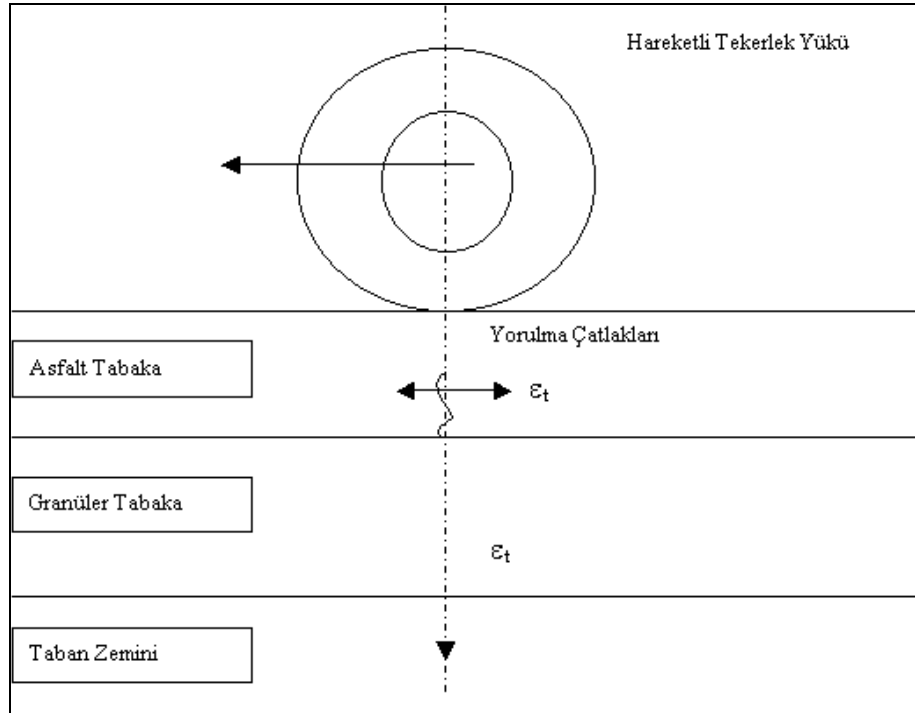
Çatlaklar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan bozulmalardır. Çatlaklar yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

2.2.1 Yorulma Çatlakları

Yorulma, tekrarlı yükler altında meydana gelmekte ve malzemelerin çekme gerilme direncinin aşılması sonucu kırılmayı ifade etmektedir (Pell, 1988).

Trafik yükleri altında, esnek yol üstyapısı, sürekli eğilmeye maruz kalmaktadır. Oluşan bozulmaların şiddeti, kaplamanın yapımına veya yapının rijitliğe bağlıdır. Yol üstünde yapılan analizler, tekerlek yüklerinden dolayı oluşan çekme birim şekil değiştirmelerin $30-200 \cdot 10^{-6}$ değerinde olduğu durumlarda, yorulma çatlaklarının oluştuğunu göstermektedir (Pell, 1988).

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, üstyapılardaki en büyük çekme gerilmesi, bitümlü kaplamanın tabanında, seyir doğrultusunda ve iki tekerlek aralığında oluşmaktadır. Çatlamlar aşağıdan yukarı doğrudur.



Şekil 2.5 Bitümlü kaplamalarda kritik birim şekil değiştirmeler ve yorulma çatlakları

Yorulma çatlaklarını önlemek için, bitümlü karışımın belirli yorulma özelliklerine göre bileşimi tasarlanmalıdır. Bu özellik, çekme birim şekil değiştirmesi (ϵ_t) ile kırılmaya sebep olan yükleme sayısı (N_f) arasındaki ilişkiye bağlıdır (Brown, 1980).

$$N_f = C * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^m \quad (2.1)$$

Bu formülde:

N_f = Yorulma çatlakları oluşturmasını başlatan yükleme sayısı

ϵ_t = Çekme birim şekil değiştirmenin maksimum değeri

c ve m = Karışımın özelliklerine ve bileşimine bağlı katsayılar. m değeri, yorulma ömrü- birim şekil değiştirme çizgi eğimidir.

Bu tip çatlaklar birbirleri ile bağlantılı olup timsah sırtı görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tümünde veya belirli kesiminde oluşmaktadırlar. Oturmadan dolayı veya yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşan yorulma çatlakları, kılcal çatlaklar biçiminde yol eksenine boyunca düzensiz bir şekilde oluşmaktadırlar. Trafik etkisi ile bu düzensiz çatlaklar giderek büyümekte ve daha sonra enine oluşan çatlaklar ile birleşerek bloklar halinde timsah sırtı görünümüne dönüşmektedirler.

Oturmadan dolayı oluşan timsah sırtı çatlaklar sivri köşeli ve düzensiz, yorulmadan dolayı oluşan timsah sırtı çatlaklar ise genellikle üniform, daha küçük boyutlarda ve bal peteği şeklinde görülmektedirler.

Bitümlü bağlayıcıların oksidasyonu, bitümlü sıcak karışımların yorulma özelliklerini etkilemektedir. Oksidasyon, kohezyonu arttırmakta ve karışımın sertliğini yükseltmektedir. Bunun sonucunda da tekerlek izi oluşumu azalmasına karşın, özellikle ince bitümlü kaplama yüzeylerinde yorulma çatlakları görülmektedir (Uluçaylı, 1976).

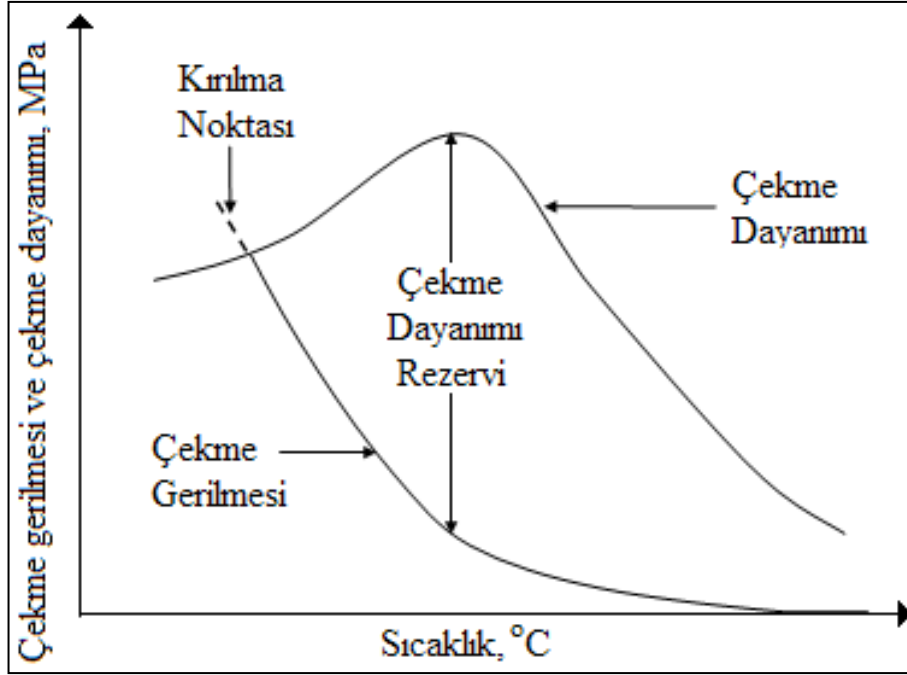
Karışımların yorulmaya karşı dirençlerinin arttırılması için yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Tasarımda ağır taşıt trafiği göz önünde bulundurulmalı,
- Kalın tabakalar kullanılmalı,
- Suyun etkisi ile zayıflayan malzemeler kullanılmamalı,
- Yapım sırasında iyi bir biçimde sıkıştırma sağlanmalı (düşük hava boşluk %si),
- Optimum bağlayıcı içeriği arttırmalı (yaklaşık %1)
- Daha yoğun gradasyon (yorulma bakış açısı ile) kullanılmalı,
- Daha yumuşak bitümlü bağlayıcı kullanılmalı (Uluçaylı 1976; Asphalt Institute, 1996).

2.2.2 Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, soğuk havalarda bitümlü kaplamanın büzülmesi ile oluşmaktadır. Dolayısı ile bu tip çatlaklar diğer çatlaklara kıyasla trafik etkilerinden değil, iklimsel etkiler ile oluşmaktadır. Düşük sıcaklık altında oluşan çekme gerilmeleri, bitümlü kaplamanın çekme mukavemetini aştığında bu tip çatlaklar oluşmaktadır. Özellikle yaşlanmış bitümlü kaplamalar bu tip çatlakların oluşmasına yatkındır. Çatlakların genel özelliği enine yönde ve yukarıdan aşağı doğru olmasıdır (Zeng, 1995).

Sıcaklığa bağlı olarak kaplamada meydana gelen çekme gerilmeleri ve kırılma sıcaklığı Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6 Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplamanın çekme mukavemeti (Stock ve Arand, 1993)

Şekilde, çekme mukavemeti rezervi gösterilmektedir. Bu kavram, kırılma sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda trafik etkileri ile meydana gelen çekme gerilmelerine karşı bitümlü kaplamaların dayanım ölçüsü olarak düşünülebilir (Stock ve Arand, 1993).

Genel olarak bitümlü kaplamaların düşük sıcaklık altındaki davranışlarını etkileyen faktörler dört bölüm altında Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler (Isaccson ve ark., 1997)

Faktörler	Etkileri
1.Malzeme	
1.1.Bitümlü Bağlayıcı (Kıvamı, Rijitlik, viskozite ve penetrasyon) Sıcaklığa Karşı Duyarlılık	Çok Büyük Çok Büyük Yok Sayılacak Kadar Düşük
1.2.Agrega Tipi (Şekli, Yüzey Yapısı ve Porozite)	
1.3.Bitümlü Sıcak Karşımın Kompozisyonu Bitümlü Bağlayıcı Oranı Agrega Gradasyonu Filler Oranı Hava Boşluk Oranı	Küçük (yaşlanmamış),Büyük (yaşlandırılmış) Küçük Daha Fazla Çekme Birim Şekil Değiştirme Küçük (yaşlanmamış), Büyük (yaşlandırılmış)
1.4.Bitümlü Karışım Özellikleri Rijitlik Çekme Mukavemeti Termal Büzülme Katsayısı	Çok Büyük Düşük Büyük
1.5.Karışım veya Bitümlü Bağlayıcı Katkı Maddesi	Orta
2.Çevresel Faktörler	
2.1.Sıcaklık	Çok Büyük
2.2.Soğuma Oranı	Büyük
2.3.Oksidasyon	Çok Büyük
3.Üstyapı Faktörleri	
3.1.Kaplama Genişliği	Bilinmiyor
3.2.Kaplama Kalınlığı	Orta-Büyük
3.3.Bitümlü Tabaka ile Temel Tabakası Arasında Sürtünme Katsayısı	Orta Küçük
3.4.Taban Zemin Tipi	
4.Diğer Faktörler	
4.1.Kaplama Yaşı	Çok Büyük
4.2.Trafik Etkileri	Bilinmiyor
4.3.Yapım Etkileri	Bilinmiyor

Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, bitümlü bağlayıcı özellikleri, bitümlü kaplamalarda oluşan düşük sıcaklık çatlakları bakımından büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, bitümlü bağlayıcının rijitlik, penetrasyon ve yumuşama noktası gibi reolojik parametrelerinin karışımın kırılma sıcaklığındaki davranışları üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Zeng, 1995). Örneğin karışımlarda bitümlü bağlayıcının yaşlanma özelliği dikkate alınmalıdır. Çünkü okside olmuş, yani yaşlanmış bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha duyarlıdır. Bu tip bozulmaları önlemek için sıcaklığa karşı duyarlılığı az olan ve daha yumuşak bitümlü bağlayıcı seçilmelidir. Bitümlü sıcak karışımlarda nem veya suya bağlı bozulmalar “soyulma” olayı ile incelenmektedir.

2.3 Suya Bağlı Bozulmalar

Agrega ve bitümlü bağlayıcıdan oluşan esnek yol üstyapılarında karşılaşılan sorunların arasında suya bağlı bozulmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu tip bozulmalar, kaplama tabakasının altında veya su içeriğinin en fazla olduğu aşınma ve binder tabakalarının arasında başlamakta ve yol yüzeyinde derin çukurluklar, yorulma çatlakları ve agrega danelerinin yol yüzeyinden ayrılması şeklinde görülmektedir.

Karışımların suya bağlı bozulmaları üç sınıfta incelenmektedir.

- Agrega daneleri ile bağlayıcı arasındaki bağın azalmasına bağlı bozulmalar (adezif bozulmalar),
- Bağlayıcı kohezyonunun azalmasına bağlı bozulmalar
- Donma gibi çevresel etkiler nedeni ile agrega danelerinin kırılmasına bağlı bozulmalar (Terrel ve Swailmi, 1987).

Adezif bozulmalar, bağlayıcının agrega danelerine yapışabilme özelliğini kaybedip, dane yüzeyinden ayrılması sonucu; kohezif bozulmalar ise, kütle halinde bulunan bağlayıcı filminin dışarıdan gelen etkiler nedeni ile akarak ince film halinde kopması sonucu oluşmaktadır.

Örneğin, kaplamadan sökülmüş olan agrega daneleri üzerinde asfalt lekeleri yoksa kaplamanın bozulma sebebi agrega daneleri ile bağlayıcı arasındaki adezyon yetersizliğidir. Kaplamadan ayrılmış olan agrega daneleri bağlayıcı ile sarılmış durumda ise, kaplamanın bozulma sebebi bağlayıcının düşük kohezyonlu olması ve çekme gerilmelerinin bağlayıcı filminin çekme dayanımını aşmış olmasıdır.

Brown (2001), bu iki tip bozulmadan adezyon bozulmasının, tamamen veya parçalı bir şekilde bağlayıcı ile agrega arakesitinde oluştuğunu, kohezyon bozulmasını ise bağlayıcı ve agrega düğümünün reolojik analizi ile açıkladığını belirtmiştir.

Kaynaklarda kohezyonun tanımına sık rastlanmamakla birlikte, karışımın kohezif direncinin adezyon kapasitesindeki düşmeden kaynaklandığı bilinmektedir.

İnce film halinde bulunan bağlayıcıların karışım içinde sudan nasıl etkilendiği henüz ispatlanamamıştır. Ancak kaplama içindeki boşluklara nüfuz eden su basıncı nedeni ile bağlayıcının dane yüzeyinden sıyrılmadan kopması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir (Fromm, 1974).

Karışımların suya karşı duyarlılıkları bağlayıcıların adezyon ve kohezyon yeteneklerine bağlı olmasına karşın, araştırmalar daha çok bağlayıcı filmi ile agrega daneleri arasındaki bağın zayıflaması sonucu oluşan bozulmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Kaynaklarda bu tip bozulmalar soyulma olarak tanımlanmaktadır.

2.3.1 Bitümlü Sıcak Karışımların Suyu Karşı Duyarlılıklarını Etkileyen Faktörler

Karışımların suya karşı duyarlılıkları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Agrega cinsi,
- Bağlayıcı cinsi,
- Karışım tasarımı ve yapımı
- Çevresel faktörler
- Trafik etkileri (Stuart, 1990).

Bu faktörler ayrıntılı olarak Tablo 2.3'te verilmektedir.

2.3.1.1 Agreganın Etkisi

Agreganın suya bağlı bozulmalar üzerinde etkilerini değerlendirmeye ilişkin çalışmalar üç olguya ayrılmaktadır (Stuart, 1990).

- Yüzey enerjisi,
- Kimyasal bağ,
- Mekanik etkileşim (mechanical interlock).

Tablo 2.3 Suya karşı duyarlılığı etkileyen faktörler (Stuart, 1990)

<p>1-Agrega</p> <ul style="list-style-type: none"> ● <u>Agrega Kompozisyonu</u> <ul style="list-style-type: none"> -Yüzey Kimyası -Mineral Türü -Agrega Kaynağı -Asitlik Derecesi, pH ● <u>Fiziksel Özellikler</u> <ul style="list-style-type: none"> -Köşelilik -Yüzey Pürüzlülüğü -Yüzey Alanı -Gradasyon -Gözeneklilik -Geçirgenlik ● <u>Kum ve kil içeriği</u> ● <u>Su içeriği</u> ● <u>Bozulmaya Karşı Dayanımı</u>
<p>2-Bağlayıcı</p> <ul style="list-style-type: none"> ● <u>Kimyasal Kompozisyonu</u> ● <u>Sertliği</u> ● <u>Damıtma İşlemi ve Ham Petrolün Kaynağı</u>
<p>3-Karışım Tasarımı ve Yapımı</p> <ul style="list-style-type: none"> ● <u>Hava Boşluk Oranı ve Sıkışma Düzeyi</u> ● <u>Geçirimsizlik ve Drenaj</u> ● <u>Film Kalınlığı</u>
<p>4- Çevresel Faktörler</p> <ul style="list-style-type: none"> ● <u>Sıcaklık</u> ● <u>Donma- Çözülme Döngüsü (Freeze-thaw cycles)</u> ● <u>Nem veya Rutubet Durumu</u> ● <u>Kaplama Yaşı</u>
<p>5- Trafik</p>

Kaplamalarda görülen soyulma ve diğer suya bağlı bozulma davranışlarının yukarıda sayılan üç olgunun kombinasyonuna bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu olgulara bağlı teoriler, bağlayıcı-agrega-su arakesitini değerlendirmelerine karşın, birçok çalışma bağlayıcı etkilerinden çok agrega etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Agreganın sudan kaynaklanan bozulmalar üzerine büyük etkiye sahip olduğuna inanılmaktadır.

Yüzey enerji teorileri malzemelerin, serbest yüzey enerjilerini azaltarak termodinamik olarak nasıl daha dengeli hale geldiklerini incelemektedir. Kimyasal bağ çalışmaları, malzemelerin kimyasal yapılarını ve kimyasal reaksiyonları adezyon ile ilişkilendirmeye çalışmaktadır. Her iki olguda da bağlayıcı içindeki moleküller arakesitte kendilerini dengeleyerek adezivitelerini arttırmaktadırlar. Bağlayıcının arakesit bölgesi, kütle halindeki bağlayıcı ile absorpsiyonun meydana geldiği agrega ve bağlayıcının değme bölgesi arasındaki bağlayıcı tabakanın bir bölümüdür. Her iki

olgu da, bağ dokusunu değişik yönlerden incelemektedir. Mekanik etkileşim ise, agreganın fiziksel özellikleri üzerinde durmaktadır (Majidzadeh, 1968).

- Yüzey enerji teorileri

Yüzey enerji teorileri, yüzey moleküllerinin dengesiz yüke sahip olduklarını ve bu yüklerin yüzey moleküllerini birbirlerine çektiklerini belirtmektedir.

Serbest yüzey enerjisi (kuvvet*uzunluk); yüzey moleküllerinin sahip oldukları enerji ile arakesitteki moleküllerin sahip oldukları enerji farkıdır. Bu da, yüzey gerilimi (kuvvet/uzunluk) ile malzemenin yüzey alanı çarpımına eşittir. Serbest yüzey enerjisi yüzeyde depolanan enerjidir. Malzemeler serbest yüzey enerjilerini en aza indirmeye çalışmaktadırlar. Eşit viskoziteye sahip iki sıvıdan düşük yüzey gerilimine sahip olanı, birim alanda daha az serbest yüzey enerjisine sahip olacağından katı üzerinde daha fazla yayılacaktır. Genel olarak, yüzey gerilimi ile serbest yüzey enerjisi sıcaklık artışı ile düşmektedir (Stuart, 1990).

Tablo 2.4'te bağlayıcı, su ile çeşitli malzemelerin yüzey gerilim değerleri verilmektedir (Thelen, 1958).

Tablo 2.4 Malzeme cinslerine ilişkin yüzey gerilme değerleri (Thelen, 1958)

Malzeme Cinsleri	Yüzey Gerilme Değerleri (Dın/cm)
Kayalar veya Mineraller ile Bağlayıcı	
Kireçtaşı ve bağlayıcı	21-26
Kum ve bağlayıcı	22-30
Kuartz ve bağlayıcı	30
Kayalar veya Mineraller ile Su	
Kireçtaşı ve su	58-64
Silika kumu ve su	83
Bağlayıcı ve su	0-16
Kum ve zift	40,5

Yukarıdaki tablo incelendiğinde, kireçtaşı ile bağlayıcı arasındaki yüzey gerilme değerinin, dolayısı ile serbest yüzey enerjisinin diğerlerine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bu durum da kireçtaşı ile bağlayıcı arasında bağın daha fazla olduğunu göstermektedir.

Bağlayıcı üzerinde yapılan çalışmalar, yüksek polariteye sahip suyun bağlayıcıyı, birçok agrega üzerinden sıyrabileceğini göstermiştir. Çünkü polar sıvılar, polar olmayanlara kıyasla agregaların yüzey enerjilerini azaltmaktadırlar (Stuart, 1990).

Tablo 2.4'te görüleceği gibi agrega ile su arasındaki yüzey enerjisi, agrega ile bağlayıcı arasındaki enerjiye göre daha fazladır. Bu durum suyun olumsuz etkisini meydana getirmektedir. Ancak soyulma olayı tek başına su ile bağlayıcıya bağlı değildir. Soyulma kavramı değerlendirilirken karışım özellikleri de göz önüne alınmalıdır.

Yüzeysel çekim yaklaşımında Şekil 2.7'de görülen kuvvetlerin dengesi, formül 2.2'deki eşitlik ile sağlanmaktadır.

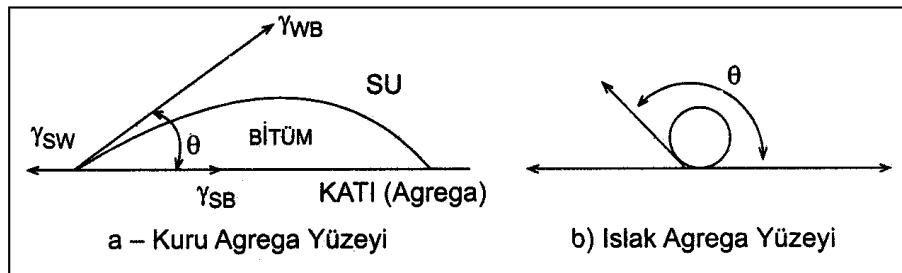
$$\gamma_{SB} - \gamma_{SW} = \gamma_{WB} \times \cos \theta \quad (2.2)$$

γ_{SB} = Agrega-su yüzeysel çekimi

γ_{SW} = Agrega-bitüm yüzeysel çekim

γ_{WB} = Bitüm-su yüzeysel çekim

θ = Bitüm değme açısı



Şekil 2.7 Agrega-bitüm-su fazında değme açısı (Stuart, 1990)

Agrega-bitüm-su fazındaki yüzeysel gerilme değerleri ve değme açıları aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Deney sıcaklığı,
- Agrega danesinin pürüzlülük özellikleri,
- Atmosferik etkiler,
- Bağlayıcının emilme (adsorbsiyon) derecesi,
- Su taneciğinin büyüklüğü ve adsorbsiyonu gibi faktörlere bağlıdır.

Genel olarak, değme açısı ne kadar küçük ise, adezyon da o kadar artmaktadır (Voyutsky, 1978).

Kaynaklarda, adezyonun minimum değme açısına ve serbest yüzey enerjisine bağlı olduğu bilinmesine karşın, bağlayıcı-agrega-su fazının özellikleri tam olarak açıklanamamış ve modeller geliştirilememiştir. Bu alanda yapılan deneysel çalışmalar birçok kabuller içermekte ve yapılan kabuller de kaplamada meydana gelen soyulmayı tam olarak temsil edememektedir.

Agregalarda dengesiz yüzey yüküne sahip olan daneler enerjilerini vererek, bağlayıcı ile daha fazla adezif bağ oluşturmakta ve suya karşı duyarlılıklarını azaltmaktadırlar (Stuart,1990).

• Kimyasal Bağ

Kimyasal bağ üzerine yapılan araştırmalar, agrega ile bağlayıcı arasında adezif kuvveti etkileyen, suda çözünmeyen kovalent bağ oluştuğunu göstermiştir. Bu bağ, agrega ve bağlayıcının pH değerine bağlıdır. Malzemenin pH değeri hidrojen-iyon aktivitesine işaret etmektedir. Bu değer 7 den küçük olması, hidrojen-iyon yoğunluğunun ve asidik özelliklerinin arttığını; 7'den büyük olması ise hidrojen-iyon yoğunluğunun azaldığını ve bazik özelliklerinin arttığını göstermektedir (Majzadeh, 1968).

Malzemelerin pH değerlerini ölçmeye bağlı kimyasal bağ çalışmaları asidik bir malzeme ile bazik bir malzeme arasında çok kuvvetli bir bağ oluştuğunu belirtmektedir. Bağlayıcıların kimyasal bağa ilişkin deneylerinde daha fazla asidik özellik gösterdikleri belirlenmiştir. Bu durum, bazik agregaların çok kuvvetli bağ,

asidik agregaların ise zayıf bağ oluşturdıkları sonucunu doğurmaktadır (Gzemski, 1970).

Mack (1964), agregaları hidrofilik ve hidrofobik (lipofilik) olarak iki bölümde incelemiştir. Hidrofobik agregaların bazik tipte ve sudan çok bitümlü malzemeye karşı bir çekim içerisinde olduğunu, hidrofilik agregaların ise asidik tipte ve soyulmaya karşı daha yatkın olduklarını belirtmiştir.

Kimyasal bağa ilişkin yapılan çalışmalar agregaların asidik ve bazik özelliklerini yalnızca pH değerlerine bağlı olarak değil, kimyasal bileşimleri açısından da incelemiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi agregalar hem bazik hem de asidik davranış göstermektedirler ve kimyasal bileşimleri gözönüne alındığında asidik dereceleri, içerdikleri silika (SiO_2) yüzdelerine bağlıdır. Silika yüzdesi, agregaların bağlayıcıya yapışma özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Yüksek silika içeren agregaların asidik tipte olduğu; düşük silika içeren veya hiç içermeyen agregaların ise bazik tipte olduğu kabul edilmektedir (Rice, 1959). Tablo 2.5'te bazı agregaların silika içerikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.5 Bazı agregaların silika içerikleri (Rice, 1959)

Agrega Cinsi	Silika İçeriği (%)
Granit	68.3
Kuarsit	74.2
Kumtaşı	76.1
Kireçtaşı	3.8
Dolomitik Kireçtaşı	16.2
Bazalt	51.7

- Mekanik Etkileşim

Agrega köşeliliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün artması, mekanik etkileşimi arttırmakta, bu durum da suya bağlı bozulmaların etkilerini azaltmaktadır. Ancak agreganın köşeliliği arttıkça homojen bir bağlayıcı film kalınlığı elde etmek oldukça güç olabilmektedir. Çok keskin kenarlarda bağlayıcı filmi çok inceltmek ve kırılmaya karşı duyarlı hale gelmektedir. Agreganın köşeliliğinin ve pürüzlülüğünün artması agreganın bağlayıcı arasındaki yüzey veya değme alanını da arttırmaktadır.

Bu durum, artan mekanik etkileşime bağlı olarak karışımın bağlayıcı ihtiyacını da arttıracaktır (Stuart, 1990).

Agreganın köşeliliği ve bağlayıcı ile olan değme alanı agreganın danelerini kırarak arttırılabilmektedir. Ancak yüzey enerji faktörlerinin de göz önüne alınması gereklidir. Kırma işlemi sırasında yeni dengesiz kuvvetler oluşabilmekte, bu durum da bağlayıcı ve agreganın tipine bağlı olarak suya karşı duyarlılığı arttırmakta veya azaltmaktadır. Araştırmacılar, genellikle kırma işleminin sudan kaynaklanan bozulmaları arttırdığını belirtmektedirler (Thelen, 1958).

Bağlayıcı ile agreganın arasında mekanik etkileşim ve değme alanı, agreganın gradasyonuna da bağlıdır. Kaynaklarda bu konuya ilişkin bilgilere rastlanmamaktadır. Ancak agreganın karışımının gradasyon değerleri üzerinde değişiklikler yapılarak kaplamanın suya karşı daha az duyarlı hale getirilebileceği düşünülmektedir (Stuart, 1990).

Agreganın gözenekliliğinin artması ile değme alanının ve bağlayıcı absorpsiyonunun arttığı bilinmektedir. Ancak uzun dönem bağlayıcı absorpsiyonunun, karışımların suya karşı duyarlılığına etkisi tam olarak anlaşılmış değildir. Agreganın geçirgenliği ise, suyun agreganın bir noktasından diğer bir noktaya difüzyonuna olanak verdiğinden istenmeyen bir faktördür (Stuart, 1990).

Toz ve kil içerikleri bağlayıcı-agrega arasında kanallar yaratarak suyun etkilerini arttırmaktadırlar. Araştırmalar, suyun var olduğu durumlarda, toz minerallerinin bağlayıcıyı emülsifiye ederek soyulmaya yol açtığını göstermiştir (Şengöz, 2003).

Agreganın su içeriğindeki artış, bağlayıcının adezivitesini düşürmektedir. Plentte karıştırma sırasında agrega daneleri tam olarak kurumuş gözüktüğü halde, daneler üzerinde dengesiz kuvvetleri azaltan adsorbe edilmiş su tabakaları bulunmaktadır. Bu adsorbe edilmiş su tabakalarının soyulma üzerine etkileri tam olarak anlaşılmış değildir (Thelen, 1958).

2.3.1.2 Bitümlü Bağlayıcı Etkisi

Bağlayıcının sertliği, suya karşı duyarlılık üzerinde etkili olabilmektedir. Isıtılan bağlayıcının viskozite değeri, karıştırma işlemi sırasında tüm agrega danelerinin bağlayıcı ile kaplanmasına olanak verecek şekilde, yeterince düşük olmalıdır. Karışım zamanı da aynı derecede önemlidir. Tüm danelerin sarılmasından sonra normal sıcaklıklarda, sert bağlayıcıların dane üzerinden sıyırılması çok zor olmakta ve suya bağlı bozulmalara karşı dirençleri artmaktadır. Ancak bu direncin yalnızca bağlayıcının sertliği ile ilişkili olup olmadığı tam olarak bilinmemektedir (Şengöz, 2003).

Bağlayıcının kimyasal bileşiminin suya karşı duyarlılık üzerinde etkilerine ilişkin çalışmalar kısıtlıdır. Araştırmacılar daha çok agrega danelerinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Plancher ve ark. (1977), bağlayıcıların kimyasal gruplarını ve bu grupların su ile yer değiştirme özelliklerini incelemişlerdir. Uyguladıkları deneyler, bu gruplardan karboksilik asitlerin, anhidritlerin ve sülfoksitlerin su ile kolay yer değiştirebildiklerini göstermiştir. Ancak adı geçen araştırmacılar, karboksilik asit ve sülfoksit gruplarının suya bağlı bozulmalar üzerinde etkilerine ilişkin bir model geliştirememişlerdir.

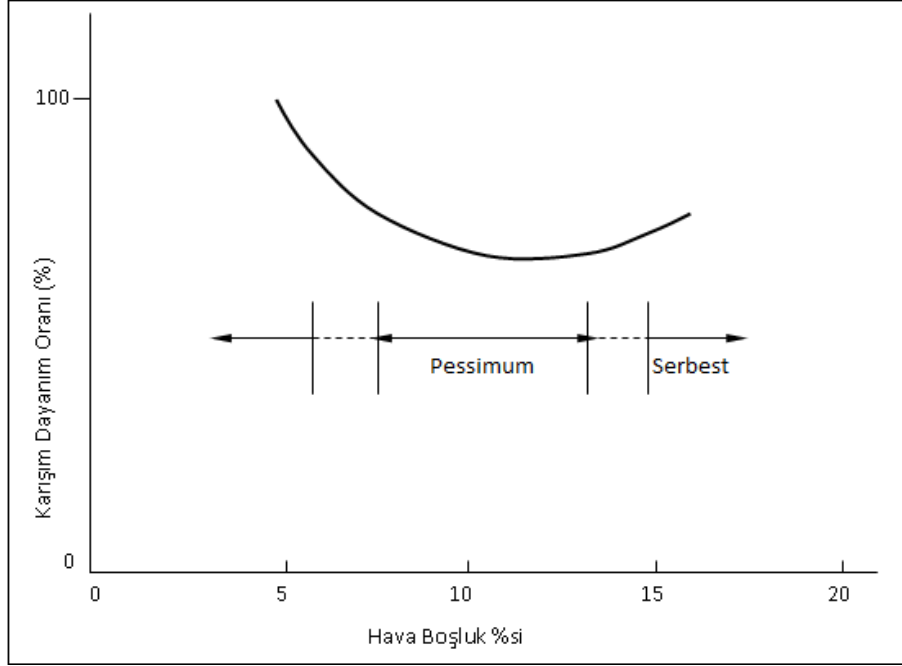
Bağlayıcı kaynağının ve damıtılma şeklinin de suya karşı duyarlılık üzerinde etkileri göz önüne alınmalıdır. Çünkü kaynağı aynı olan bağlayıcıların bile birbirlerine göre değişik özellikleri olabilmektedir (Stuart, 1990).

2.3.1.3 Karışım Tasarımı ve Yapım Etkisi

Karışımların sıkıştırılma düzeylerinden, bağlayıcı içeriklerinden ve agrega gradasyonundan etkilenen hava boşluk içerikleri ve geçirgenlikleri, kaplamaların drenaj ve suya doygunluk derecelerinin kontrolü bakımından önemlidir. Genel olarak kaplamalarda hava boşluk yüzdelerindeki artış, suyun bu boşluklara nüfuzunu ve suya bağlı bozulmaları arttıracaktır (%15-%25 boşluk oranına sahip açık gradasyonlu karışımlarda durum farklıdır çünkü bu tip karışımlarda su, boşluklarından içinden geçerek alt tabakalara etki etmeden kaplamayı terk etmektedir) (Abson ve Burton, 1966).

Hava boşluğu içeriklerinin karışımların dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 2.8'de görülmektedir. Yatay eksen hava boşluk yüzdeleri, dikey eksen ise, karışım dayanım oranları verilmektedir.

Bu oran, koşullandırılmış numunenin (vakum ile doyurulmuş numuneler üzerinde donma-çözülme işlemleri uygulanmış) indirekt çekme gerilme değerinin, kuru numunenin indirekt çekme gerilme değerine bölünmesi şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 2.8 Karışımların hava boşluk içeriklerine bağlı dayanımları (Terrel ve Swailmi, 1987)

Terrel ve Swailmi (1987), hava boşluk yüzde değişimlerini üç ayrı bölümde incelemişlerdir:

Birinci bölüm düşük hava boşluklarını içeren karışımlardır. Hava boşluk değerleri küçük olduğu için, karışımlar geçirimsizdir. Karışımlarda düşük hava boşlukları bağlayıcı miktarının artırılması ve gradasyonun ayarlanması ile sağlanabilmektedir.

İkinci bölüm pessimum hava boşluk içeren karışımlardır. Pessimum, kaynaklarda optimumun karştı olarak tanımlanmaktadır. Bu tip boşlukları içeren karışımlar yolun performansını ve servis ömrünü olumsuz yönde etkilemektedirler ve suyun etkilerine karşı çok duyarlıdırlar.

Üçüncü bölüm açık gradasyonlu ve suyun drenajına olanak veren karışımlardır.

Majidzadeh (1968), film kalınlıklarının bitümlü sıcak karışımların suya karşı duyarlılığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Majidzadeh çalışmasında, karışımlarda bağlayıcı içeriğinin artırılması ile film kalınlığının artacağını ve bu nedenle geçirgenliğin düşerek suya karşı duyarlılığın azalacağını belirlemiştir.

2.3.1.4 Çevresel Faktörlerin Etkisi

Donma ve çözülme olaylarına bağlı su hareketleri ve yarattıkları basınçlar, bağlayıcı filminin kırılmasına yol açarak soyulmayı artırmaktadırlar. Düşük sıcaklık ve yorulma çatlakları da suyun çatlaklara girmesine olanak verdiği için suyun etkilerini artırmaktadırlar.

Sıcaklığın etkisi de göz önüne alınması gereken bir faktördür. Yol üzerinde yapılan çalışmalar, soğuk havalarda yağmur suyunun adezyon üzerinde olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu tip çevresel koşullarda sıkıştırma işlemi zor olacağından, kaplamada hava boşluğu oranları ve geçirgenlikleri fazla olacak ve suya karşı duyarlılık artacaktır (Abson ve Burton, 1966).

Yaşlanma, bağlayıcıların sertliğini arttırmakta ve bu durum da suya karşı duyarlılığı azaltabilmektedir. Yaşlanma olayı, bağlayıcının kimyasında ve yüzey enerjilerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Bu değişikliklerin suya bağlı bozulmalar üzerindeki etkileri bilinmemektedir (Stuart, 1990).

2.3.1.5 Trafik Etkisi

Trafik etkisi ile bağlayıcı, agrega daneleri üzerinden ayrılabilen ve çatlaklar oluşturabilmektedir. Bu durum da suyun kaplama içine girmesine neden olmakta ve suya karşı duyarlılığı artırmaktadır.

Yukarıda anlatılanların ışığında suya karşı duyarlılığı etkileyen faktörler aşağıdaki biçimde özetlenebilmektedir.

- Agrega danelerinin kurutulma sıcaklıklarının artırılması,
- Agrega danelerinin köşeliliğinin, pürüzlülüğünün artırılması,
- Bağlayıcı film kalınlığının artırılması,
- Hava boşluk oranı ve geçirgenliğin azaltılması,
- Uygun bir drenajın sağlanması,

- Agrega danelerinin düşük sıcaklık ve donma-çözülme etkilerine bağı olarak oluşan çatlakların azaltılması,
- Agrega danelerinin üzerindeki toz zerreciklerinin uzaklaştırılması, karışımların suya karşı duyarlılıkları azalmaktadır.

Soyulmayı etkileyen faktörler göz önüne alındığında, her çeşit agreganın soyulabildiği görülmektedir. Agregaları soyulma potansiyellerine göre sınıflandırmak zordur. Çünkü her zaman soyulmaya dirençli veya her zaman soyulabilen agregaya yoktur. Agregada gradasyonu, agregada kaynağı ve bağlayıcı özellikleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Karışımların hava boşluk oranları, çevresel faktörler ve trafik düzeyi, suya bağı bozulmalar üzerinde son derece önemlidir.

DeneySEL çalışmalarda suya bağı bozulmalar üzerinde İKA katkıların etkinliği AASHTO T 283 yöntemi kullanılarak ayrıntıları ile ele alınmıştır.

BÖLÜM ÜÇ

MODİFİKASYON

Bu bölümde; modifikasyonun amacı, modifikasyon işleminde kullanılan malzemeler ve polimerler hakkında genel bilgiler verilecektir.

3.1 Modifikasyonun Tanımı ve Amacı

Modifikasyon, yol üstyapılarında kullanılan bağlayıcının veya karışımın performansını arttırmak amacı ile bağlayıcının içine çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda ve şartlarda karıştırılması olarak tanımlanmaktadır (Malkoç, 2002).

Bitüm, viskoelastik bir malzemedir ve reolojik davranış göstermektedir. Bitüm aynı zamanda termoplastik bir malzemedir ve ısıtılınca kıvamı değişmektedir. Bitümün bağlayıcı olarak kullanılmasını sağlayan özelliklerinden biri de budur.

Bitümün viskoelastik karakteri aynen bitümlü sıcak karışıma yansımaktadır. Viskoelastik malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) daha ziyade elastik davranış ve yüksek mukavemet göstermektedirler. Buna karşın düşük yükleme hızlarında (yavaş veya duran taşıtlar) viskoz davranış ve düşük mukavemet göstermektedirler. Orta hızlarda ise ortak elastik ve viskoz davranış sergilemektedirler (Hunter, 1994).

Bitüm aynı zamanda termoplastik özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklarda düşük mekanik mukavemet, düşük sıcaklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonlar büyük ölçüde bitümün ve karışımın bu özelliklerine bağlıdır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar bitüme, bitümle uyumlu bazı polimer ve katkıların eklenmesinin bitümün reolojik davranışını etkilediğini, özelliklerini iyileştirdiğini ve bitüme üstün özellikler kazandırdığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, bitüme polimer ilavesinin ana amacı, bitümün viskoelastik davranışını

değiştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmaktır (Choquet, 1994).

Tez kapsamında ele alınan İKA katkıları bir sonraki bölümde ayrıntıları ile ele alınacağı gibi gerek karışımın sıcaklık özellikleri gerekse ekonomi üzerinde sağladığı olumlu faydalar bakımından modifikasyon tanımlaması içinde yer almıştır.

Modifikasyonun bitüm ve bitümlü karışım üzerindeki etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde etmek ve böylece kalıcı deformasyonları azaltmak,
2. Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini azaltmak,
3. Kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek,
4. Karışımların stabilitesini ve mukavemetini arttırmak,
5. Karışımların yorulma direncini arttırmak,
6. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,
7. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
8. Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini artırarak, soyulmayı azaltmak,
9. Akmayı ya da kusmayı azaltmak,
10. Yakıt dökülmelerine karşı direnci sağlamak,
11. Kaplama tabakalarının kalınlıklarını azaltmak ve daha ince aşınma tabakalarının kullanımını sağlamak,
12. Çatlakları geciktirmek,
13. Uygulama alanlarını arttırmak,
14. Absorpsiyonu minimize etmek,
15. Kaplamaların performansını yükseltmek,
16. Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak,
17. Viskoziteyi düşürerek düşük sıcaklıklarda uygun karıştırma ve sıkıştırma sağlamak.

3.2 Modifikasyon Yöntemleri

Modifikasyon yöntemlerinde pek çok katkı kullanılabilir. Bu bölümde bitümlü malzemeler ile bitümlü karışımların modifikasyon yöntemlerine ilişkin bilgiler verilecektir.

3.2.1 Bitüm Modifikasyonu

Bitümlü malzemeleri modifikasyonu yönteminde, bitüm içinde tamamen veya bir miktar eriyebilen katkılar kullanılmaktadır. Bu yöntemde bitüme ilave edilen katkı maddesi tamamen çözünerek ağısı bir yapı oluşturur. Katkı maddesi eklenerek elde edilen bitümlü malzeme belirlenen gradasyona uygun agregalar ile karıştırılarak modifikasyon tamamlanır. Polimer bazlı katkı maddeleri ile organik ve kimyasal IKA katkılar bu grubun içinde sayılabilir. Bitümün modifikasyonuna ait katkıların genel sınıflandırması Tablo 3.1’de sunulmaktadır.

3.2.1.1 Ekstender İlavesi ile Bitümün Modifikasyonu

Ekstenderler genel olarak kullanım miktarına göre, kükürlü asfalt denilen ve kükürdün az miktarda kullanıldığı uygulamalar ile fazla miktarda kükürt kullanılan uygulamalar olmak üzere iki şekilde modifiyer olarak kullanılmaktadır. Az miktardaki uygulamalarda ekstenderler bitümün seyreltilmesi işlevini görür. Fazla miktardaki uygulamalarda ise ekstenderlerin işlenebilirliği arttırdığı, silindir kullanmadan yani sıkıştırma gerekmeden, sadece finişer ile serilebilecek derecede çalışılabilir ve hizmet süresince deformasyona karşı yüksek dirençli bir karışım elde edilmektedir (Whiteoak, 2004).

Bitüm ile reaksiyona girecek ekstender miktarı sıcaklığa ve bitüm kompozisyonuna göre değişmektedir (Whiteoak, 2004). Bir ekstender olan kükürt moleküle ilave olarak veya hidrojen sülfat olarak hidrojen çıkartılması yoluyla oksitlendirilerek, en yoğun şekilde bitümün naften-aromatik kısmı ile reaksiyona girdiği gösterilmiştir (Jin ve ark. 2002; Gonzales ve ark., 2004).

Tablo 3.1 Bitüm modifikasyonlarının genel sınıflandırılması

Modifikasyon Çeşidi	Özellikleri		Kullanım Alanları
Ekstender	Kükürt Lignin (Odun özü)		Sertleşme
Kauçuk	Doğal kauçuk (Lateks) SBR (Yapay lateks) Dönüştürülmüş (İşlenmiş) Lateks Polietilen (Termoplastik kauçuk)		Düşük sıcaklık performansı Çatlak doldurma Mıcır tutma Oluklanma mukavemeti
Polimer	Elastomer	SBS	Yüksek sıcaklık performansı Sathi kaplamalar ve yalıtım Mıcır tutma Sıcak karışımlar Oluklanma (rutting) mukavemeti Çatlak doldurma
	Plastomer	EVA EBA	
Fiber	Doğal (Asbest, Taş yünü) Yapay (Polipropilen) Poliester Fiberglas		Sertleşme
Oksidan	Manganez tuzu		Sertleşme
Ilık Karışım Asfalt Katlılar	Organik	Sasobit® Asphaltan® A Asphaltan® B Licomont® BS 100	Viskoziteyi düşürme Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürme İşlenebilirliği artırma
	Kimyasal	EvoTherm® Rediset® WMX Cecabase® RT	
	Su Enjeksiyonu ile Köpüklendirme	WAM-Foam LEA® Double Barrel Green	

Bitüm yaklaşık 160 °C sıcaklıklarda düşük viskoziteli bir madde olmasından ötürü karışımı kolayca işlenebilir hale getirmektedir. Karışım soğuduğunda fazla mineral dolgu maddesi malzeme içerisindeki boşluklara kısmen dolar ve agregaların birbirleriyle sürtünmesini artırarak karışıma yüksek mukavemet kazandırır (Whiteoak, 2004).

Bir ekstender malzeme olan kükürt ile modifiye edilmiş karışım özellikleri ve davranışlarındaki değişiklikler zamana bağlıdır. İlk etapta, bu tür malzemeler ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların Marshall stabilitesi sadece bitüm kullanılarak

hazırlanan karışımların değerinden az miktarda düşük olmakla birlikte, 7 ile 21 gün sonrasında, Marshall stabilitesi, modifiye edilmemiş malzemenin stabilite değerinin yaklaşık iki katına yükseldiği, bu durumun en geçerli açıklamasının ise bitümlerle etkileşime girmesi sonucunda mineral dolgu maddesi kristalizasyonunun yavaşlaması olduğu belirtilmektedir (Whiteoak, 2004).

3.2.1.2 Kauçuk İlavesi ile Bitümlerin Modifikasyonu

Polibütadien, poliizopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, klorofin, düzensiz stirenbutadien-kauçuk, vb. gibi bileşenlerin çoğu bitüm ile birlikte kullanılmakta olup, başlıca etkileri viskoziteyi artırmaktır.

Bazı durumlarda, kauçuklar vulkanize halde (çapraz-bağlı) kullanılır. Genellikle kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen bu malzeme bitümlü karışımlara yüksek sıcaklıklarda karıştırılarak kullanılır.

Yol yapımı için kullanılan karışımlar haricinde kauçuğun bitüm ve agregaya karıştırılarak futbol ve çocuk oyun sahasında kullanılabilecek elastik yüzeye sahip malzeme yapımında da kullanılabileceği görülmektedir (Gürü ve ark., 2005).

3.2.1.3 Organo-Mangan Bileşikleriyle Bitümlerin Modifikasyonu

Organo-mangan bileşiğinin bitüm içerisinde hızlı bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla malzeme bir katalizör ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Manganın, kararlı, kimyasal direnci yüksek metalli komplekslerin oluşumunu hızlandırdığına inanılmaktadır. Bu kompleksler bitüm moleküllerini birbirine bağlayarak, bitümlü karışımın mukavemetini güçlendirmektedir.

Organo metalik mangan katkı maddesi ile kalker ve bazalt agregalarının soyulmaya karşı mukavemet değerinde genel olarak % 90 oranına ulaşan artışlar ve organo metalik mangan bileşiğinin kalkerlerde bazaltlardan daha etkin olduğu tespit edilmiştir (Gürü, 2004).

3.2.1.4 Polimer İlavesi ile Bitümün Modifikasyonu

Genellikle termoplastik kauçuklar (TR) olarak da adlandırılan stirenik blok kopolimerler, styren-butadien-styren (SBS) ya da styren-izopren-styren (SIS) ardışık polimerizasyon işlemleri ile üretilmektedir. Buna alternatif olarak styren ve orta-blok monomerin ardışık polimerizasyonu ile ardından bağlayıcı bir kimyasal bir ara maddenin reaksiyonu ile bir çift blok öncü oluşturulabilmektedir. Dolayısı ile yalnızca lineer kopolimerler değil aynı zamanda çok-kollu kopolimerler de üretilebilmekte olup, bunlar genellikle yıldız şekilli, radyal ya da dallanmış kopolimerler olarak belirtilirler (Bull ve Vonk, 1984).

Elastomerler, mukavemet ve elastikliğini üç boyutlu ağların fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde etmektedirler. Bu, polistren uç bloklarının ayrı ortamlarda toplanması ve üç boyutlu polibutadien ya da polisopren kauçuklu sistemi oluşturmaları sonucu oluşmaktadır. Polimere mukavemet kazandıran bileşen, polistren uç bloklardır, orta bloklarda malzemeye olağan üstü bir esneklik sağlar (Vonk ve Gooswilligen, 1989)

Elastomer dağılımının kalitesi çok sayıda faktörden etkilenmekle birlikte, bu faktörlerin arasında en önemlisi karıştırıcı tarafından uygulanan kesme (kesme kuvveti uygulanmaktadır) miktarıdır. Sıcak bitüme polimer eklendiğinde, bitüm hızlı bir şekilde polimer parçacıkları içerisine sızmaya başlamakta ve polimerin styren ortamlarının çözülmesini ve şişmesine neden olmaktadır. Gerçekçi bir karışım süresi içinde ve tatminkâr düzeyde dağılım elde etmek için, şişmiş parçacıklar üzerine etkiyen kesme miktarı önem taşımaktadır. Dolayısıyla, elastomerlerin bitüm içerisine uygun şekilde dağılması için, orta ve tercihen yüksek kesme kuvveti uygulayabilen karıştırıcılar gerekmektedir.

Plastomer türü polimerler, bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek, karışımın viskozitesini arttırırlar. Ancak, plastomerler bitümün elastisitesini belirgin şekilde arttıramamaktadır. Isıtıldıklarında, ayrışma ve soğuma ile kaba bir dağılıma sebep olmaktadır (Hoban, 1987).

EVA kopolimeri, etilen ve vinil asetatın ortak polimerizasyonu ile üretilen düzensiz yapılı termoplastik malzemelerdir. Vinil asetat miktarı arttıkça, kopolimer özellikleri de değişiklik göstermektedir (Gitoy, 1985). EVA kopolimerlerinin özellikleri genel olarak, moleküler ağırlığı ve vinil asetat oranı ile kontrol edilmektedir.

EVA kopolimerleri bitüm içerisinde kolayca dağılabilmekte ve iyi bir uyum sağlamaktadır. Depolama süresince, bir miktar ayrışma ortaya çıkabilir. Bu nedenle modifiye ürünün kullanımdan önce iyice karıştırılması gerekir.

Bitümü karışımlara EVA ilavesi, sadece kaplamanın performansını iyileştirmek için kullanılmamakta, ayrıca soğuk havada yapılan uygulamalarda da önemli miktarlarda EVA kullanılmaktadır. EVA, kesme kuvvetine karşı duyarlılığından (Woolley, 1986) ve daha yumuşak bitümle kullanıldığından ötürü karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır.

3.2.2 Karışım Modifikasyonu

Bitümlü karışımların modifikasyon yönteminde, uygun gradasyon ve bitüm içeriği ile hazırlanan karışımlarda katkılar üretim sırasında ilave edilmektedir. Bu tip modifikasyonlar genel olarak doğal dolgu maddeleri sınıfında yer alan katkı maddeleri ile hazırlanan bitümlü karışımlarda uygulanmaktadır. Tez kapsamında kullanılan doğal ve sentetik zeolitler de bu yöntemle bitümlü karışımlara ilave edilmektedir. Bitümlü karışımlarda kullanılan modifikasyon katkıları ve bunlara ait sınıflandırmalar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Bitümlü karışımların modifikasyonlar yöntemlerine ait genel sınıflandırma

Modifikasyon Çeşidi	Özellikleri		Kullanım Alanları
Mineral Dolgu Maddeleri	Mineral Filler - Taş tozu - Kireç - Portland çimentosu - Uçucu kül Siyah Karbon		Sertleşme
Antioksidan	Kurşun karışımları Karbon Kalsiyum tozu		Yumuşama
Soyulma Önleyici	Kireç		Soyulma önleyici
Ilık Karışım Asfalt Katkıları	Köpüklendirme	Advera WMA® Aspha-Min®	Viskoziteyi düşürme Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürme İşlenebilirliği artırma

3.3 İKA Uygulamaları

Daha önce belirtildiği gibi, İKA katkıları sağladıkları doğrudan ve dolaylı faydalar bakımından modifikasyon sınıfı içinde yerini almaya başlamışlardır. Katkıların uygulama alanları doğrudan bitüme veya karışım sırasında eklenmesi biçiminde sınıflandırılabilir.

Tez kapsamında ele alınan katkıların cinsleri, içerikleri ve uygulama yöntemleri ayrıntıları ile ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

BÖLÜM DÖRT

ILIK KARIŞIM ASFALT TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde öncelikle IKA teknolojisine ait tarihçe verilecek ardından bu teknolojinin sunduğu çevresel ve ekonomik yararları üzerinde durulacaktır. Bununla birlikte, IKA katkıların sınıflandırılması hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir.

4.1 Ilık Karışım Asfaltların Tarihçesi

IKA katkıların ortaya çıkmasını sağlayan ilk çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. Erken dönem çalışmalarda genel olarak araştırmacılar, hali hazırdaki asfalt kaplamaları geri dönüştürme için bitüme doğrudan su enjeksiyonu yöntemini denemişlerdir. Ancak yapılan bu ilk denemelerde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması nedeniyle kaplamaların servis ömrünün uzun olmadığı anlaşılmıştır. Sonraki çalışmalarda ise, soğuk karışım asfaltlardan daha üstün özelliklere sahip olan IKA'lara yönelinmiştir.

Artan çevre bilinci ve sınırlı kaynaklar nedeniyle araştırmacılar, sıcak karışım asfalt sektöründe sürekliliği sağlamak, verimliliği artırmak, üretim ve serim sırasında doğaya salınan sera gazlarının etkisi azaltmak ve ürün kalitesinden ödün vermeden maliyetleri düşürecek yeni yollar ve teknolojileri araştırmaktadır. Son yıllarda ön plana çıkan geri kazanılmış asfaltların (RAP) esnek üstyapılarda yeniden kullanımı, hem eldeki kaynakların verimliliği hem de doğaya verilen zararın azaltılması konusunda RAP'ların sürdürülebilir bir alternatif olabileceğini göstermektedir (Haichert, 2011).

Bitümlü karışımların daha düşük sıcaklıklarda üretimi fikri uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konudur. İlk çalışma 1956 yılında Iowa Devlet Üniversitesi'nden Prof. Csanyi tarafından yapılmıştır (Chowdhury ve Button, 2008). Bu çalışmada Csanyi, sahada metal bir koşullandırma kabini tasarlamıştır. Bu kabinde iki giriş, bir de çıkış bölümleri bulunmaktadır. Üstteki girişten sıcak bitüm enjeksiyonu yapılmakta, diğer girişten ise kabin içine soğuk su ilave edilmektedir. Kabin içerisine püskürtülen

soğuk su, sıcak bitümü köpükendirerek viskozitesinde bir düşüş yaratmıştır. Kabinde bulunan çığıştan elde edilen köpükendirilmiş bitüm, agrega ile karıştırılarak serim yapılmıştır (Csanyi, 1956).

Diğer çalışmalar 1970'li yılların başında Chevron tarafından asfalt emülsiyonları ile bazı karışım ve kalınlık tasarım yöntemleri geliştirilerek yapılmıştır. Chevron geliştirdiği yöntemler sayesinde asfalt emülsiyonları ile hazırlanan bitümlü karışımlara ait tasarım ve üretim işlerinde uyulması gereken bazı önemli kuralları belirlemiştir (Chevron, 1977). Devam eden çalışmalarda, asfalt emülsiyonları kullanılarak hazırlanan karışımların daha düşük sıcaklıkta hazırlandığı dolayısı ile nakliyelerinin oldukça kolay olduğu ve şehirlerarası yollarda rahatlıkla kullanılabilceği belirtilmiş, asfalt emülsiyonlarının üretildiği plantlerde yatırım maliyetlerinin oldukça düşük olduğu vurgulanmıştır (Kuenne, 2004).

Maccarone ve ark. (1994), soğuk karışım asfalt bazlı köpükendirilmiş bitüm ve yüksek oranda bağlayıcı içeren karışımlar üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalardan elde edilenlere göre, düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sayesinde üretim sürecinde daha az enerji kullanımı ve buna paralel olarak emisyon gazlarında düşüş sağlandığı belirtilmiştir (Maccarone ve ark., 1994).

90'lı yılların ikinci yarısından itibaren ilk modern İKA çalışmaları başlamış olup, elde edilen bulgular 1997 yılında düzenlenen Alman Bitüm Forumu (GBF)'da yayınlanmıştır (GBF, 1997). Yapılan organizasyonda bitüm üreticileri ve akademisyenleri İKA teknolojisi ile tanıştırmak, yüklenici firmaların gereksinimleri doğrultusunda çalışmalara yön verebilmesi hedeflenmiştir. Bunu takip eden süreçte Shell Bitüm Firması, Norveç, İngiltere ve Hollanda'da İKA ile deneme yolları ve laboratuvar deneyleri uygulamıştır (Koenders ve ark., 2000). Shell Bitüm Firması, Koenders'in yoğun gradasyon kullanarak yaptığı deneysel çalışmalardan elde ettiği veriler ışığında, WAM – Foam adlı bir İKA katkı geliştirmiştir.

Bunu takiben yapılan çalışmalarda, 1997 yılında Avrupa'da Sasol Wax International AG firması tamamen organik mum bazlı İKA katkısı olan Sasobit®

ürününü piyasaya sunmuştur. Bu tarihten itibaren ise bu işlem, IKA teknolojisi olarak adlandırılmaya başlanmıştır (Button ve ark., 2007).

Jenkins ve ark. (1999), yarı ılık köpükendirilmiş bitüm yöntemini denemiştir. Bu yöntemde, 100°C'ı aşmayacak şekilde farklı sıcaklıklarda ısıtılmış agregaları köpükendirilmiş bitümle karıştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, ön ısıtmaya tabi tutulan agregaların köpükendirilmiş bitüm ile karıştırıldıklarında, karışımdaki agregaların bitüm ile daha iyi kaplandığını, karışımın kohezyonunu, çekme dayanımını ve sıkıştırma oranını arttırdığını göstermiştir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar öncelikli olarak, fosil yakıtların daha maliyetli olduğu Avrupa, Güney Afrika ve Avustralya gibi yerlerde uygulanmaya başlanmıştır (Button ve ark., 2007).

Günümüzde soğuk/ılık karışım asfalt katkıları piyasada bulunmakla birlikte, BSK kadar yoğun olarak kullanılan bir teknoloji değildir. Ancak, potansiyel etkileri araştırılmaktadır. Son dönemde, ABD'nin birçok eyaletinde IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü kaplamalar üzerine hem laboratuvar deneyleri hem de arazi çalışmaları yoğun olarak uygulanmaktadır (Zettler, 2006).

Yapılan çalışmalar, genel olarak, yoğun gradasyonlu karışımlar üzerine olsa da, açık gradasyon, boşluklu gradasyon ve taş mastik asfalt (TMA) gibi uygulamalar için de IKA katkıları kullanımının mümkün olduğunu göstermiştir (Koenders ve ark., 2000).

4.2 Ilık Karışım Asfalt (IKA) Katkıları Sınıflandırılması

IKA katkıları farklı üretim ve uygulama yöntemlerine göre sınıflandırılmakta olup genel olarak üç gruba ayrılmaktadırlar:

- Organik katkıları (Fischer-Tropsch mumları, yağlı asit amidleri ve Montan mumları)

- Kimyasal katkılar (Emülsifikasyon katkıları veya polimerler)
- Köpüklendirme yöntemleri (Su içeren katkılar ve direkt su enjeksiyonu)

4.2.1 Organik IKA Katkıları

Organik IKA katkıları, amid veya mum içeren ve doğada rahatlıkla çözünebilen katkılardır. Bitüme doğrudan eklendiğinde erime sıcaklıklarında tamamen eriyerek bitüm içerisinde homojen dağılırlar. Bu erime sonucunda homojen olarak dağılan organik katkılar, bitümün viskozitesinde önemli ölçüde azalmaya neden olurlar (Rubio ve ark., 2012). Organik IKA katkıları, servis sıcaklığına kadar soğutulduklarında ise içerdikleri lateral kristalize yapı aktive olarak karışımın sertliğini arttırmaktadır (Shang ve ark., 2011).

Organik IKA katkıları 80-120°C erime sıcaklığına sahip yüksek moleküler hidrokarbon zincirleri olup, saf bitümün özelliklerini geliştirmektedirler. Yapılarında bulunan karbon zincirlerinin uzunluğu ile katkıların erime sıcaklığı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Karbon zinciri görece uzun olan organik IKA katkıları daha yüksek sıcaklıkta erirken, kısa karbon zincirine sahip olanlar ise düşük sıcaklıklarda erimekte-dirler (Bueche, 2009). Genel olarak, bitüme %2-4 (bitümün ağırlığına) eklenerek, karıştırma sıcaklığında 20-30°C'lık bir düşüş sağlarlar (Rubio ve ark., 2012).

Organik katkı üretim işlemi 1980'li yıllardan bu yana kullanılmakta olup, üç farklı yöntemi bulunmaktadır: (i) Fischer-Tropsch mumları, (ii) yağlı asit amidleri, (iii) Montan mumları.

Fischer-Tropsch (FT) mumları, CO/H₂ gazlarının hidrokarbon ve diğer alifatik bileşiklerin sentezi için kullanımı ile elde edilen organik mumlardır. Fonksiyonel grupları bulunmayan saf hidrokarbon olan bu organik katkı çeşidi, yüksek kimyasal stabilite ve yaşlanma direncine sahiptir. FT mumları yapılarında lateral kristaller barındırmaktadırlar. Bu kristaller üretim sırasında 105°C'dan itibaren aktive olmaktadır. Soğuma esnasında ısı servis sıcaklığına düşene kadar (yaklaşık 65°C)

bu aktivasyon işlemi devam eder. Bahsedilen servis sıcaklığında itibaren ise bu işlem tamamlanarak kristalize yapı sertleşir ve ağısı bir hal alır.(Rubio ve ark., 2012).

Doğada saf halde bulunan mumlar ile FT mumları arasında uzun karbon zinciri ve kristalize yapıdan kaynaklanan bazı yapısal ve fiziksel farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar sayesinde FT mumları saf mumlara kıyasla yaşlanmaya karşı daha dirençli olup, çok daha uzun süre depolanabilmektedirler (Hurley ve Prowell, 2005). Tez kapsamında kullanılan Sasobit® katkısı bu grup içerisinde yer almaktadır.

Yağlı asit amidleri ile organik IKA katkı üretimi yöntemi aminlerin yağlı asitlerle sentezlenmesi prensibine dayalı endüstriyel bir işlemdir. Yağlı asit amidleri 140-145°C sıcaklıkta tamamen eriyerek bitüm içerisinde homojen olarak dağılmaktadırlar. Soğutulduklarında ise 135-140°C sıcaklıkta kristalizasyon işlemlerini tamamlayıp, bitümlü karışımın stabilitesini ve deformasyonlara karşı direncini arttırlar (D'Angelo ve ark., 2008).

Montan mumu (linyit mumu) özel mumsu linyitten elde edilmektedir. Kimyasal açıdan, Montan mumu esas olarak fosil yağ asidi esterlerinden oluşmaktadır. Montan mumları, gliserid olmayan uzun zincirli karboksilik asit esterleri, serbest uzun zincirli organik asitler, uzun zincirli alkoller, ketonlar, hidrokarbonlar ve reçinelerin bir kombinasyonudur. Montan mumlarının erime sıcaklıkları 75°C civarı olduğundan genellikle amid mumlar gibi erime sıcaklığı yüksek olan malzemelerle birlikte kullanılırlar. Montan mumlar ek karıştırma zaman gerektirdiklerinden, ya önce mikserde yüksek erime sıcaklığı olan malzemelerle karıştırılarak bitüme eklenir ya da direkt olarak mastik asfalt karışımına ilave edilir (Vaitkus, 2009 a; 2009b). Bu gruba örnek olarak Asphaltan B® katkısı verilebilir.

Tez kapsamında organik katkı olarak, Fischer-Tropsch yöntemi ile elde edilen Sasobit® IKA katkısı kullanılmıştır. Organik IKA katkısı olan Sasobit®'e ait detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Piyasada çok kullanılan organik bazlı IKA katkılardan bazılarına ait örnekler aşağıda verilmiştir:

4.2.1.1 Sasobit®

Sasobit®, Güney Afrikalı Sasol Wax firması tarafından üretilmekte ve modifiye katkı veya asfalt yayılma iyileştiricisi olarak tariflenmektedir. 2, 5, 20 ve 600 kg'lık paketlerde bulundurulmaktadır. İsteğe göre pul veya toz halinde elde edilebilmektedir. Sasobit®, Fischer – Tropsch (FT) işleminde kullanılan, kömür gazından elde edilen, ince kristal ve uzun zincirli alifatik hidrokarbon bir yapıya sahiptir. FT işleminde karbonmonoksit (CO) 1 ile 100 karbon atomundan meydana gelen büyük moleküler zincir uzunluklarına sahip hidrokarbon karışımlarına dönüşür. Sasobit®'in erime sıcaklığı 98°C'dir. 115°C'ta bağlayıcının içerisinde tamamen çözünmektedir. Ayrıca bağlayıcının vizkositesini de arttırmaktadır. Sasobit®, karışıma istenen vizkositeyi sağlamak için %3 oranında katılmalı, bağlayıcıya düşük sıcaklık etkisini yaşatmamak için %4'ten fazla konmamalıdır (Corrigan, 2008).

4.2.1.2 Asphaltan B®

Asphaltan B®, Almanya, Amsdorf'ta, Romonta GmbH firması tarafında geliştirilmiş olup, 25 kg'lık paketler halinde satılmaktadır. Silindirlenmiş Asfaltlar için özel olarak üretilmiş olup, Montan mumu ve yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar içeren maddelerin bir karışımıdır. Üretici firmaya göre Asphaltan B®, karışımın ağırlığınca %2 – 4 arası eklenmelidir. Asphaltan B®, doğrudan bitümlü bağlayıcıya eklenebileceği gibi, karışıma veya polimer modifiye bitüme de eklenebilmektedir. 98°C'ta eriyen Asphaltan B®, daha rahat bir sıkıştırma sağlarken tekerlek izi oluşumuna karşı direnci de artırır (Corrigan, 2008).

4.2.1.3 TLA-X®

TLA-X® sıkça kullanılan diğer bir çeşit organik bazlı IKA katkısıdır. Doğada hâlihazırda bulunan Trinidad Göl Asfaltı'ndan (TLA) elde edilen mineraller, bitüm

ve diğ er malzemelerin endüstriyel bir iş leml e bir araya getirilmesiyle elde edilen bu IKA katkısı genel itibari ile pul halinde elde edilmektedir. TLA-X[®] direkt olarak bitüme ilave edilebildiğ i gibi bitü mün karış ıma eklenmesi aş amasından hemen ö nce de karış ıma eklenebilmektedir. Plente taş ınması sırasında ya da depolanması süresince az miktarda kil ile karış tırılması malzemenin topaklanmasına engel olmaktadır. Buna ek olarak, tasarım ö ncesinde içeriğindeki bu kil varlığ ının hesaba katılması gerekmektedir (West et al. 2010).

4.2.1.4 Shell Thiopave[®]

Bu organik IKA katkısı kükürt ve patentli organik sıkış tırma katkısının bir kombinasyonudur (Tran ve ark., 2010). Bu teknolojinin temelini bitüme eklenen kükürdün karış ımdaki agregaların tam olarak bitüml e kaplanmasını sağ laması oluşturmaktadır (Prowell ve ark. 2009). Bitümlü malzeme içerişindeki kükürt kristalize olarak kalıcı deformasyonlara karşı direnci arttırmaktadır (Prowell ve ark., 2009). Shell Thiopave[®] piyasada küçük pullar şeklinde satılmakta olup, herhangi bir plent modifikasyonu gerektirmemektedir (Tran ve ark., 2010; West ve ark., 2010). Yapılan deneysel çalışmalar ış ığında, Shell Thiopave[®] yaklaşık 140°C tamamen erimekte ve yapısında bulunan kükürt bitüme doğ rudan karış maktadır (Prowell ve ark. 2009).

4.2.3 Kimyasal IKA Katkıları

Genel olarak kimyasal IKA katkıları, emülsifikasyon katkıları, yüzey iyileştiriciler, polimerler ile agregaların tamamen bitüml e kaplanmasını sağ layan, işlenebilirliğ i, sıkış tırmayı ve adezyonu arttıran katkıların bir kombinasyonudur. Kimyasal IKA katkıları direkt olarak bitüme ilave edilmekte ve daha sonra bu karış ım agrega ile karış tırılmaktadır. Kullanılan ü rünün içeriğindeki malzemelere karış tırma sıcaklığ ında 15-75°C'lık düş üç sağ lamaktadırlar (Von Devivere, 2011).

Kimyasal IKA katkıları üretici firma tavsiyeleri ve yapılan deneysel çalışmalara göre genel olarak, karış ım içerişine bitü mün ağırlığınca %1,5 ile %2,0 oranlarında

bulunmaktadır. Kimyasal katkıları üretim ve karıştırma işlemleri sırasında herhangi bir plent modifikasyonu gerektirmemektedir (Prowell ve Hurley, 2007 .). Bununla birlikte, kimyasal İKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda herhangi bir soyulma önleyici katkıının ilavesine gerek duyulmamaktadır (Chowdhury ve Button, 2008).

4.2.3.1 *Evotherm*[®]

Evotherm[®], MeadWestvaco Asphalt Innovations, Charleston, South Carolina firması tarafından geliştirilmiştir. *Evotherm*[®], kimyasal bir katkıdır. *Evotherm*[®] kimyasalı, asfalt emülsiyonu ile birlikte geleneksel asfalt bağlayıcısına uygulanır. Bu emülsion daha sonra BSK plentinde agrega ile karıştırılır. Bu kimyasal, agreganın tamamen bitüm ile kaplanmasını, işlenebilirliği, adezyonu ve sıkıştırmayı kolaylaştırır. Üretici firmanın yapmış olduğu arazi çalışmalarında karıştırma sıcaklığında yaklaşık 40°C'lık düşüş gözlemlenmiştir. Böylelikle enerjiden %55 oranında tasarruf edilirken, atmosfere salınan karbon dioksit (CO₂) ve kükürt dioksitte (SO₂) %45 oranında azalma görülmüştür (Corrigan, 2008).

4.2.3.2 *Rediset WMX*[®]

Rediset WMX[®], Akzo Nobel Surfctants tarafından imal edilen tanecik halinde kimyasal bir İKA katkısıdır. Katı halde olup, yüzey iyileştiriciler ve reolojik modifiyerlerin bir kombinasyonudur (Martin ve ark., 2011). Bunlara ek olarak, *Rediset WMX*[®] soyulma önleyici bir malzeme olarak davranmakta ve suya bağlı bozulmalara karşı direnci arttırmakla birlikte, agrega ile bitüm arasındaki adezyonu da arttırmaktadır (Prowell ve ark., 2009). Bu İKA katkısı bitüme direkt olarak katılmaktadır.

Tez kapsamında kimyasal katkı olarak *Rediset*[®] *WMX* İKA katkısı kullanılmıştır. *Rediset*[®] *WMX*'e ait detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

4.2.3.3 *Cecabase RT*[®]

Arkema Group tarafından üretilen bu kimyasal IKA katkısı, %50'si yenilenebilir hammaddelerden oluşan patentli bir sıvı kimyasaldır (Santucci, 2010). Yapılan deneysel çalışmalarda, bitüme direkt olarak ve ağırlıkça % 0,3 – 0,5 oranlarında katılması tavsiye edilmektedir (Prowell ve ark., 2009). *Cecabase RT*[®] agrega7bitüm ara yüzüne etki ederek bitümün reolojik özelliklerini değiştirmeden işlenebilirliği arttırmaktadır (Gonzalez-Leon ve ark., 2009).

4.2.4 *Köpüklendirme Yöntemleri*

Köpüklendirme yöntemi iki farklı şekilde uygulanmaktadır uygulanmaktadır (Larsen, 2001):

1. Su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesi (zeolit) ilavesi
2. Bitüme doğrudan su enjeksiyonu

4.2.4.1 *Su Tutma Özelliğine Sahip Bir Katkı Maddesi (Zeolit) İlavesi*

Katkı kullanılarak uygulanan bu yöntemde, bitümün içerisine yüksek su tutma kabiliyetindeki malzeme (sentetik ve doğal zeolit) ilave edilerek suyun buharlaşması sağlanmaktadır. Oluşan buhar, bitümü köpüklendirerek kısa süreli hacim artışına ve viskozitenin düşmesine olanak tanıyarak, sınırlı bir süre zarfında işlenebilirliği ve agregaların bitüm ile kaplanmasına neden olmaktadır (Butz ve ark., 2001).

Su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesi kullanılan köpüklendirme yönteminde katkılar karışım üretim esnasında eklenmektedir.

Dünyanın birçok yerinde köpüklendirme yöntemi olarak kullanılan sentetik zeolite alternatif olarak, ülkemizde 50 milyar ton civarında rezervi bulunan doğal zeolitin kullanılabilirliğinin araştırılması, üretim maliyetlerinin daha da düşürülmesi ve ülke ekonomisine sağlayacağı katkılarının irdelenmesi bu çalışmanın özgün değeri

olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, tez kapsamında sentetik zeolit olarak kullanılan Advera WMA® katkısı ile karşılaştırmak için doğal zeolit kullanılmıştır.

4.2.4.1.1 *Aspha–Min*®. *Aspha–Min*®, Eurovia Services GmbH, Bottrop, Almanya tarafından üretilen bir katkıdır. 25 veya 50 kg'lık paketlerde, ince beyaz toz halinde bulunur. Hidro termal kristalize edilmiş sentetik zeolit (Sodyum Alüminyum Silikat) şeklinde üretilmektedir. Zeolit içerisinde su, ağırlıkça %21 oranında tutularak 85°C ile 180°C arasında atmosfere salınır. *Aspha – Min*® karışıma eklendiğinde az miktarda bir su çıkışı gözlenir. Bu su çıkışı karışımda hacmen genişlemeye yol açarak asfalt köpüğü oluşturur ve bu oluşum işlenebilirliği arttırmakla birlikte karışımdaki agregaların düşük sıcaklıklarda tamamen kaplanmalarını sağlar (Corrigan, 2008).

Üretici firmanın (Eurovia) deneysel çalışmalarına göre, ağırlığınca % 0,3 oranında *Aspha – Min*® eklenmesi, geleneksel BSK'ya göre sıcaklığı yaklaşık olarak 12°C düşürmektedir. Düşüşteki bu oran, harcanan yakıt göz önüne alındığında %30 oranında bir enerji korunumu sağlamaktadır. Yine üretici firmaya göre bilinen bütün asfalt çeşitleri, polimer modifiye karışımlar ve geri dönüşüm asfaltların tamamında güvenle kullanılabilir (Corrigan, 2008).

4.2.4.1.2 *Advera*® WMA. PQ Corporation tarafından Amerika Birleşik Devletleri'ne üretilmektedir. Kristalize yapıda, %20 oranında su içeren bir sentetik zeolittir. Yapısındaki bu su, 98°C üzerindeki sıcaklıklarda açığa çıkarak bitümde köpüklenmeye neden olur. Bu miktardaki su (karışımın %0.05'i oranında), bitümün hacminde ufak çaplı bir artış yaratarak, karışımın işlenebilirliğini artırır. Bu durum sıcaklık 98°C'ın altına düşene kadar devam eder (Walker, 2009). Karışımın %0,25'i oranında bitüme eklenmesi tavsiye edilen katkı, yoğun, açık ve boşluklu gradasyona sahip karışım tasarımlarında, polimer modifiye bitümlerde ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanılabilir. *Advera*® WMA inorganik bir malzeme olduğundan bitümün penetrasyon sınıfını değiştirmez. Karışım ve sıkıştırma sıcaklıklarında sağladığı düşüşle çevreye zararlı emisyon değerlerinde %60 azalmaya neden olurken, %30 oranında da enerjinin korunumunu sağlar (Corrigan, 2008).

Tez kapsamında köpükendirme yöntemlerinden su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesi olarak Advera® WMA IKA katkısı kullanılmıştır. Advera® WMA'ya ait detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

4.2.4.1.3 WAM-Foam® WAM-Foam®, Shell Uluslararası Petrol Şirketi ile Norveçli Kolo-Veidekke Şirketi arasındaki yatırım ortaklığı sayesinde üretilmektedir. WAM - Foam®, karışım sırasında kullanılan iki ayrı bileşenle elde edilmektedir. Karışımın iki ayrı bileşene ayrılmasıyla, yumuşak bağlayıcı ve köpük formundaki sert bağlayıcı, üretimde düşük asfalt sıcaklığına ulaşılmış olunur. İlk kademedeki yumuşak bağlayıcı bileşen 110°C'da agrega ile karıştırılarak yüzey tamamen kaplanması sağlanır. Sert bağlayıcı ise ikinci etapta, agregaların köpük ile kaplanmasından hemen önce kullanılır. Sıcak sert bağlayıcıya soğuk suyun enjekte edilmesiyle su, ani olarak buharlaştırılır ve bu şekilde karışımında yüksek hacimli köpük elde edilmiş olur. Son olarak sert bağlayıcı ile yumuşak bağlayıcı birbirlerine bağlanarak son aşamayı oluştururlar. Üretici firmaya göre, WAM - Foam®'ın karışımındaki performansı, yumuşak ve sert bileşenlerin seçimiyle yakından ilişkilidir. Bazı durumlarda birinci etapta, karışıma adezyonu arttırmak için iyileştirici bir katkı maddesini eklenmesi gerekebilir. Yine birinci adımda, kimi durumlarda, su, bağlayıcı ile agrega arasından uzaklaştırılmamakta ve bunun için yüksek kaliteli bir son ürün eklenmelidir. WAM - Foam®, üretim sırasında yakıttan ve çevreye salınan CO2'ten %30 oranında düşüş sağlamaktadır (Corrigan, 2008).

4.2.4.2 Bitüme Doğrudan Su Enjeksiyonu

Bitüme doğrudan su püskürtme tekniğinde ise ikisi giriş biri ise çıkış olmak üzere üç ağızlı bir özel bir kabin kullanılmaktadır. Üstteki ağızdan kabine sıcak bitüm enjeksiyonu yapılırken, ikinci ağızdan ise soğuk su püskürtülür. Soğuk su bitümde ani bir köpüklenme yaratarak hacim artışına neden olmaktadır. Kabindeki üçüncü ağızdan ise köpükendirilmiş bitümün tahliyesi yapılarak agrega ile karıştırılır (Zaumanis, 2010).

Yapılan ayrıntılı araştırmalarda, karışıma sonradan eklenen suyun, karışımın uzun servis ömrü süresince soyulma gibi bazı problemlere neden olabileceği belirtilmiştir (Austerman ve ark.,2009; Wielinski ve ark., 2009; Kvasnak ve West, 2009; Jones ve ark., 2010). Düşük sıcaklıklarda kurutma işlemi uygun bir şekilde yapılmayan agregalarla (zellikle su absorpsiyonu görece fazla olan kalker) hazırlanan bitümlü karışımlarda suya bağlı bozulmalar daha sık görülmektedir (Hearon, 2008).

Önceden de belirtildiği gibi köpüklendirme yöntemlerinin tamamında işlemin sonunda ortaya çıkan köpük, viskoziteyi düşürerek yapım aşamasında işlenebilirliği arttırmakta ve böylelikle agregaların tamamen bitüm ile kaplanmasını sağlamaktadır (Kristjansdottir, 2007; Prowell ve Hurley, 2007; D'Angelo, 2008). Ancak, serim ve sıkıştırma sonrası köpüklerin ve sıcaklığın düşmesiyle birlikte viskozite değeri artmaktadır. Üretim veya serim esnasında sıcaklıkta ani düşüşlerin yaşanması halinde ise suyun yeterli derecede buharlaşamadan karışımın içerisinde kalabilmektedir. Bu durum, servis ömrü boyunca meydana gelebilecek donma-çözünme döngülerinde kaplamada adezyonun bozularak çatlamalara neden olabilmektedir (Hurley ve Prowell, 2006).

Kpklendirilmiş bitümlü karışımlarda karışımın mukavemetinin tam olarak sağlanması, suyun tamamen buharlaşmasının ardından mümkün olmaktadır (Bowering, 1970). Ruckel ve ark. (1982) yaptıkları çalışmada, köpüklendirilmiş asfalt kaplamalarda birkaç hafta sonra bozulmaların (tekerlek izi oluşumu ve sklme) görüldüğünü belirtmiştir. Bunun sebebinin yetersiz buharlaştırma sürecinde yapılan uygulamalar olduğu açıktır. Zira, Clarke (1976), erken dönemlerde yapılan bu çalışmaların hizmet süresine ve sıcaklığa bağlı olarak kaplamanın özelliklerini geliştirdiğini ifade etmektedir. Lee (1981), buharlaşama süresinin etkisi için çevresel etkenlerin de değerlendirilerek şartnamelerin oluşturulması gerektiğini ifade etmiştir. Bu nedenle, Engelbrecht (1985) köpüklendirilmiş bitümlerin oldukça az miktarda depolanması gerektiğini tavsiye etmiştir.

4.2.4.2.1 *Double Barrel® Green*. Bu sistem Astec Industries tarafından geliştirilmiş bir köpüklendirme sistemidir (Carter ve ark.2010). Bu çeşit köpüklendirme teknikleri mekanik bir sistem ile sıcak bitüme doğrudan su enjeksiyonu yapılması nedeniyle serbest su sistemi olarak adlandırılmaktadır (Prowell ve ark., 2009). Bu işlemde plente haricen bir mekanizma eklenerek plent modifikasyonu yapılmaktadır. Bu mekanizma, özetle, 10 adet püskürtücü uça sahip olup bitüme sıcak haldeyken su enjekte ederek köpüklenme sağlamaktadırlar (D'Angelo ve ark., 2008).

4.2.4.2.2 *Terex® WMA*. Bu teknolojinin en önemli özelliği, drum miksin hemen dışında bir kabin içerisinde bitüme doğrudan farklı oranlarda su enjeksiyonu yapılarak bitümün köpüklenmesinin sağlanmasıdır (Santucci, 2010; Martin ve ark., 2011). Bu işlemden sonra drum miks içerisinde köpüklendirilmiş bitüm ile agregalar karıştırılmaktadır (Prowell ve ark., 2009).

4.2.4.2.3 *Aquablack™ WMA*. Bu sistem, Maxam Equipment tarafından üretilen bir başka serbest su sistemidir. Bu teknolojiye kabin ortasına yerleştirilmiş köpüklendirme tabancası ile sıcak bitüme doğrudan su enjeksiyonu yapılmaktadır (Prowell ve ark., 2009). Aquablack™ mikro-baloncuklar oluşturarak agrega ile bu şekilde karıştırılır. Bu durum, karışımın işlenebilirlik süresinin uzamasına yardımcı olmaktadır (Prowell ve ark., 2009; Santucci, 2010).

Dünya genelinde kullanılan IKA katkılara ait genel bilgiler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 IKA katkılara ait genel bilgiler (Zaumanis, 2010)

Katkı Çeşidi	Üretici	Açıklama	Kullanılan Ülke	Katkı Oranı	Üretim sıcaklıkları (veya sıcaklık düşüşleri), °C
ORGANİK					
Sasobit	Sasol	FT mumu	Dünya geneli	Karışımın ağırlıkça %1-3	↓10-30 130-150
Asphaltan A Romonta N	Romonta GmbH	Montan mumu	Almanya	%1,5-2,0	↓20
Asphaltan B	Romonta GmbH	Montan mumu + yağlı asit amidleri	Almanya	%2,0-5,0	↓20-30
Licomont BS 100	Clarlant	Yağlı asit amidleri	Almanya	%3,0	↓20-30
3E LT or Ecoflex	Colas	Üreticiye özel bilgi	Fransa	Öneri verilmemiş	↓30-40
KİMYASAL					
Evotherm ET	Mead-Westvac o	Kimyasal bitüm emülsiyonu	Dünya geneli	Emülsiyon ile gelmektedir	↓40-75 85-115
Evotherm DAT	Mead-Westvac o	Kimyasal + Su	Dünya geneli	%30	↓45-55 85-115
Evotherm 3G	Mead-Westvac o	Kimyasal + Su	A.B.D	Belirlenmemiş	↓33-15
Cecabase RT	Arkema Group	Kimyasal	A.B.D, Fransa	%0,2-0,4	120
Rediset WMX	Akzo Nobel	Katyonik yüzey iyileştirici + organik	A.B.D, Norveç	%1,5-2,0	↓16 126
Revix	Mathy-Ergon	Mum + polimer	A.B.D	Belirlenmemiş	↓15-26
KÖPÜKLENDİRME TEKNİKLERİ					
Aquablack	MAXAM	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu	A.B.D	-	-
Double Barrel Green	Astec	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu	A.B.D	-	116-135
Low Energy Asphalt	LEACO	Su bazlı sıcak kaba agrega ile nemli kum karışımı	A.B.D, Fransa, İspanya, İtalya	Bitümün ağırlığınca ±%0,5	105-124
Low Energy Asphalt	McConnau-ghay Tech.	Kimyasal ve bitüme doğrudan su enjeksiyonu kombinasyonu	A.B.D	Bitümün ağırlığınca %0,4	90
Ultrafoam GX	Gencor Indust.	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu	A.B.D	-	-

Tablo 4.1 IKA katkılara ait genel bilgiler (devam)

Katkı Çeşidi	Üretici	Açıklama	Kullanılan Ülke	Katkı Oranı	Üretim sıcaklıkları (veya sıcaklık düşüşleri), °C
WAM-Foam	Shell and Kolo-Veldekke	İki farklı bitüm çeşidi ile bitüme doğrudan su enjeksiyonu	A.B.D, Norveç	Yumuşak bitüme soyulma önleyici eklenebilir	110-120
Warm Mix Asphalt System	Terex Roadbuilding	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu	A.B.D	-	↓32
LEAB	BAM	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu + suyun kaynama noktası altındaki agrega karışımı	Hollanda	Bitüm ağırlığına %0,1 + adezyon katkısı	90
LT Asphalt	Nynas	Bitüme doğrudan su enjeksiyonu + higrofilik filler	İtalya, Hollanda	Karışımın ağırlıkça %0,5-1,0	90
Advera	PQ Corporation	Su tutma özelliğine sahip zeolit	A.B.D	Karışımın ağırlıkça %0,25	↓10-30
Aspha-Min	Eurovia	Su tutma özelliğine sahip zeolit	A.B.D, Fransa, Almanya	Karışımın ağırlıkça %0,3	↓20-30

4.3 Ilık Karışım Asfalt (IKA) Katkılarının Yararları

4.3.1 Çevresel ve Ekonomik Yararları

Son yüz yılda meydana gelen küresel iklim değişiklikleri ile sera gazlarının tetiklediği küresel ısınma ve doğal kaynakların hızla azalmasına bağlı olarak artan çevre bilinciyle birlikte araştırmacılar çevreye duyarlı teknolojilere yönelmişlerdir. Bu düşünce doğrultusunda geliştirilen IKA teknolojisinin çevresel yararları ve sağlayacağı ekonomik kazançlar halen değerlendirilmektedir. Bu bağlamda geliştirilen IKA katkıları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Yapılan birçok çalışmada IKA'ların plantlerdeki üretimi sırasında BSK'lara göre % 30-40 daha az enerji gerektirdiği ifade edilmiştir (Jenkins ve ark.,1999; Barthel ve von Devivere,2003). Üretim sırasında elde edilen enerji kazancına bağlı olarak ton başına yaklaşık 4\$'lık bir tasarruf elde edilmektedir (McKenzie, 2006).

IKA katkıların sağladığı düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sayesinde gerek üretim gerekse serim sırasında meydana gelen emisyon gazlarının salımında % 75-90 oranında azalmalar görülmüştür (Barthel ve Von Devivere,).

Larsen ve ark. (2004) Norveç'te yaptıkları ayrıntılı çalışmalarda asfalt plantlerinde üretilen IKA'ların BSK'lara göre;

- % 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

sağladığını tespit etmişlerdir.

Sampath (2010), yapmış olduğu çalışmada IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımların BSK'lara göre emisyon değerlerini oldukça düşürdüğünü belirtmiştir. Bu düşüşe ilişkin değerler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 IKA katkılarıyla hazırlanan bitümlü karışımlardaki emisyon düşüş değerleri (Sampath, 2010)

Sera Gazı Çeşidi	Emisyon Değerlerindeki Azalış (%)
CO ₂	15 – 40
SO ₂	18 – 35
NO _x	18 – 70
CO	10 – 30
Toz	25 – 55

Romier ve ark. (2006), LEA (Low-Energy Asphalt) IKA katkısı kullanarak yaptıkları deneysel çalışmalarda IKA katkısı ile hazırlanan asfalt örneklerinin üretimi sırasında harcanan enerjide BSK'lara oranla % 50'lik bir tasarruf, CO₂, N₂O ve CH₄ gibi sera gazlarında ise yine % 50'lik azalma sağlandığını tespit etmişlerdir.

Bahsedilen yararların yanı sıra IKA teknolojisi, karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarında ve uçucu organik bileşikler (VOC) ile polisiklik aromatik hidrokarbon

(PAH) salımında önemli ölçüde azalma sağladığından, üretim ve serim esnasında çalışanların sağlığına zarar vermemektedir (Chowdhury ve Button, 2008).

4.3.2 Sıkıştırılmaya Yararları

IKA teknolojisi, karışımın sıkıştırılma işlemini oldukça kolaylaştırmaktadır. İklim şartlarının sert olduğu arazi koşullarında dahi kolay sıkıştırma sağlamaktadır. IKA'lar, düşük sıcaklarda ısı ve viskozite arasındaki dengeyi kurarak karıştırma ve sıkıştırmayı uygun viskozite altında gerçekleştirmektedir (Ministère des transports du Québec, 2008).

Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi'nin (NCAT) organik, kimyasal ve zeolit içeren katkıları üzerinde uyguladıkları deney sonuçlarına göre, düşük sıcaklıklarda sıkıştırma sonrası elde edilen hava boşluk değerlerinde ortalama %0,65 ile %1,40 oranında azalma sağlandığı belirlenmiştir (Zhang, 2010)

4.3.3 Nakliye Kolaylığı

Plentten alınan IKA oldukça kolay bir şekilde serim yapılacak yere taşınabilmektedir. Bitümlü karışımlardaki en büyük sorunlardan birisi plentten alınan karışımın, serim alanına nakliyesi sırasındaki soğuması ve dolayısıyla istenen sıkıştırma sıcaklığında olmayan karışımın hedeflenen hava boşluk oranının tutturulamamasıdır. Ancak, IKA karışımların sıkıştırma sıcaklığının düşük olması sebebiyle bu sorun en aza indirgenmektedir (Croteau ve Tessier, 2008). Bunun nedeni, maddeler arasındaki ısı transferi oranının malzemelerin sıcaklık farklılıklarıyla birebir ilişkili olmasıdır. Yüksek sıcaklıktaki bir malzeme, daha düşük sıcaklıktaki bir diğer malzemeye göre daha fazla ısı kaybına uğramaktadır. Bu bağlamda, BSK'ya oranla daha düşük sıcaklığa sahip olan IKA'lar daha az ısı kaybına uğrayacağından, daha uzak mesafedeki serim sahasına rahatlıkla ulaştırılabilmektedir (Moore, 2007) .

4.3.4 Geri Dönüşüme Katkısı

IKA katkılarıyla hazırlanan bitümlü karışımların sağladığı en büyük faydalardan biri de karışımda geri kazanılmış asfaltların kullanımına izin vermesidir (Zhang, 2010; Hurley ve Prowell, 2005).

Geri dönüşüm oranı, geri dönüştürülen asfaltın ısı transferiyle çok yakından ilgilidir. Geri dönüşüm sırasındaki ısı transferi, hidrokarbonların buharlaşmasına kadar (mavi duman çıkışı) yapılır. Bu ısı transferi, kaplamanın geri dönüşümünü %35 oranında arttırmaktadır (Croteau ve Tessier, 2008).

Mogawer ve ark. (2009) yaptıkları çalışmalarda, BSK'lardan aldıkları yüksek orandaki geri kazanılmış asfaltı uygun gradasyon değerleri ile IKA katkılarıyla hazırlanan bitümlü karışımın içerisine ilave etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, karışıma eklenen yüksek miktardaki geri kazanılmış asfaltın, yeni karışımın sertlik derecesini arttırdığı ve işlenebilirliğini azalttığı belirlenmiştir. Bu sebeple, yüksek oranda geri kazanılmış asfalt kullanımının, yeni karışımda yüksek oranda IKA katkı kullanımını gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

Mallick ve ark. (2008) yüksek sıcaklıklarda yaptıkları deneysel çalışmalarda, IKA'larda yüksek oranda geri kazanılmış asfalt kullanımının mümkün olabileceğini belirlemişlerdir. Yeni karışıma bitümün ağırlıkça %1,5'i oranında organik IKA katkı ilavesi ile %75 oranında geri kazanılmış asfaltın kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Yapılan bazı çalışmalarda Türkiye'de çevresel faktörler ile trafik yükleri göz önüne alındığında %30 oranında RAP kullanımının geleneksel BSK'lara kıyasla kaplama performansında önemli ölçüde iyileşme sağlandığı görülmüştür (Şengöz ve Oylumluoğlu, 2013).

4.3.5 Performansa Etkisi

Yapılan laboratuvar çalışmalarının yanı sıra 1990'ların ortalarından itibaren farklı IKA katkıları kullanılarak arazi çalışmaları da yapılmaktadır. Bu çalışmalar ışığında IKA karışımlarla yapılan kaplamaların performansları genellikle BSK ile hazırlanan karışımlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak küçük bir kısım BSK sonuçlarıyla eş değer bulunmuştur (Croteau ve Tessier, 2008).

2002 yılında Avrupa genelinde IKA'larla yapılan yeni bitümlü kaplamaların performans değerlendirmeleri için Avrupa Tarama Turu (European Scan Tour) gerçekleştirilmiştir. Buna göre, IKA'lar ile BSK benzer performans özellikleri göstermiştir. Sonraki yıllarda yapılan turlarda ise IKA katkıları ile yapılan yolların BSK'lara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Bhusal, 2008).

NCAT'te 2005 yılında farklı IKA katkı ve agrega çeşitleri üzerinde yapılan kapsamlı araştırmalarda performans sonuçları değerlendirilmiştir. Bu deneylerde, karışımın sertliği esneklik modülü deneyi ile, tekerlek izi deneyi asfalt kaplama analizörü (APA) ile, neme karşı duyarlılık deneyi ise TSR deneyi ile saptanmıştır (Akisetti, 2008).

Yoğunluk deneyi sonunda elde edilenlere göre, IKA katkıları hava boşluğu oranını düşürerek sıkıştırmayı iyileştirmiştir. Esneklik modülü deneyi sonuçları dikkate alındığında IKA katkılarının sertlik derecesi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. TSR deneylerine göre ise, IKA katkılarının neme karşı duyarlılıklarının arttığı sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda soyulma önleyici katkıların kullanımı tavsiye edilmektedir (Hurley ve Prowell, 2005; Akisetti, 2008).

Aşağıda IKA teknolojisinin sağladığı faydalar ana başlıklar halinde özetlenmektedir.

4.3.5.1 İşlenebilirliğe Etkisi

Yapılan birçok çalışmada IKA katkıların viskozite değerlerini düşürerek işlenebilirliği arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum kapsamında, her bir IKA katkısı birbirlerinden bir miktar farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar kullanılan IKA katkı oranına da bağlıdır.

Austerman ve ark. (2009) yaptığı çalışmalarda, bitüme %1,5-3,0 oranında Sasobit® ilavesinin viskoziteyi azaltarak karışımın işlenebilirliğinin arttığını belirtmiştir. Bunun için IKA katkılarla hazırladıkları bitümlü karışımlara Brookfield viskozite deneyi ile Massachusetts Üniversitesi'nde geliştirilen Asfalt İşlenebilirlik Cihazı (AWD) deneyi uygulanmıştır.

Middleton ve Forfylow (2009) farklı IKA katkıları (Sasobit®, Evotherm®, Aspha-Min®, LEA, Double Barrel® Green ve WAM-Foam®) ile yapmış oldukları çalışmalara göre, tüm IKA katkıları işlenebilirliği artırarak, düşük sıcaklıklarda uygun sıkışmayı sağladıklarını ifade etmektedir.

4.3.5.2 Tekerlek İzi Oluşumuna Etkisi

Bazı çalışmalar, IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda tekerlek izine karşı direncin, BSK'lara göre daha az olduğunu belirtmektedir. Bunun nedeni olarak, IKA'ların BSK'lara göre daha düşük sıcaklıklarda uygulanması gösterilmektedir (Brower ve ark., 2012).

Hurley ve Prowell (2005, 2006) farklı IKA katkıları ile yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, asfalt kaplama analizi (APA) deneyi ile tekerlek izi derinliklerinin ölçmüşlerdir. Farklı agrega çeşitleri (kalker ve granit) ve bitüm kullanarak yapılan çalışmalarda numuneler, farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, Aspha-Min® ile hazırlanan bitüm örneklerinde tekerlek izi oluşumuna etkisinin az olduğu, Sasobit® ve Evotherm® RT ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinde ise derinliğin azaldığı belirlenmiştir. Xiao ve ark. (2010) ise

IKA katkıların tekerlek izi oluşumuna karşı BSK'lara göre önemli bir farklılık ya da iyileşme göstermediğini vurgulamıştır.

D'Angelo ve ark. (2008), IKA uygulamalarının yapıldığı ülkelerdeki araştırmalarının sonucunda, IKA katkıların tekerlek izi oluşumuna BSK'lara göre aynı ya da daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir.

Benzer bir çalışma yapan Wielinski (2009), Double Barrel® Green teknolojisi için APA deneyiyle tekerlek izi derinliklerini tespit etmiştir. Buna göre belirtilen IKA teknolojisinin tekerlek izi oluşumuna karşı daha hassas olduğu belirlenmiştir.

Geri kazanılmış asfalt kaplamalar (RAP) ile yapılan çalışmalara göre, IKA katkıları ile %45 oranında RAP kullanımının tekerlek izi derinliğini arttırdığı belirlenmiştir (Copeland ve ark., 2010).

4.3.5.3 Yorulmaya Etkisi

Kanitpong ve ark. (2007), DSR deneyinden elde ettikleri veriler ışığında, Sasobit® IKA katkısı ile hazırladıkları bitümlü malzemelerin saf bitüm ile hazırlanan kontrol numunelerine göre yorulmaya karşı daha dirençli olduklarını vurgulamaktadır.

D'Angelo ve ark. (2008), Fransa, Almanya ve Norveç'te Sasobit® ve Aspha-Min® IKA katkıları ile hazırlanan asfalt kaplamaları üzerinde performans değerlendirmesi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, bahsi geçen IKA katkıları kullanılarak yapılan kaplama uygulamalarında BSK'lara oranla benzer yorulma sonuçları elde edilmiştir. Bununla birlikte, araştırmacılar servise açılan bu yolların henüz ^yıldan daha az bir süredir trafiğe açık olduklarını vurgulamaktadırlar.

Diefenerfer ve Hearon (2008), yine Sasobit®'in yorulma performansını değerlendirmek amacıyla yapmış oldukları çalışmalarda, iki farklı agrega karışımı kullanmışlardır. Bu karışımlardan birincisi silt ve granit agrega karışımı olmakla birlikte, nominal maksimum agrega boyutu 9,5 mm'dir. İkincisi ise nominal

maksimum agrega boyutu 12,5mm olan kalker – kum çakılı karışımıdır. Her bir agrega karışımı aynı oranda Sasobit® içeren bitümlü malzeme ile karıştırılarak yorulma deneyine tabi tutulmuştur. 9,5mm nominal maksimum agrega boyutu ile hazırlanan karışımlar düşük birim deformasyonlarda yorulmaya karşı daha az direnç gösterirken, yüksek birim deformasyonlarda BSK'larla benzer davranışlar göstermiştir. 12,5mm nominal agrega boyutuna sahip karışımlarda ise hem düşük hem de yüksek birim deformasyonlarda BSK'lar ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı çalışmadaki bir diğer önemli bulgu ise, IKA katkıları ilke hazırlanan bitüm örneklerinin üretim sıcaklıklarındaki artış, yorulma sürelerinin de uzamasına neden olmaktadır.

Kvasnak ve ark. (2010), Ultrafoam GX® IKA katkısı ile hazırladıkları bitümlü karışımlar için de benzer bir yorulma davranışı elde etmişlerdir. Asfalt plentinde hazırlanarak laboratuvar koşullarında yeniden ısıtılan numuneler 85°C'da beş gün süre ile yaşlandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, düşük birim deformasyonlarda IKA katkılı örnekler BSK'lara göre daha düşük yorulma süresine sahipken, yüksek birim deformasyon değerleri için IKA örnekler BSK'lar ile benzer bir davranış göstermektedir.

Yapılan bu çalışmalar ışığında, yüksek birim deformasyonlarda IKA'lar BSK'larla aynı ya da daha iyi yorulma sonuçları vermektedir. Ancak düşük birim deformasyon değerleri için IKA'lar BSK'lara göre daha yorulmaya karşı daha az dayanıklıdır.

4.3.5.4 Düşük Sıcaklık Çatlaklarına Etkisi

Apeageyi ve Buttlar (2007), Evotherm® IKA katkısı ile PG 64-22 performans sınıfı bitümlü malzemeyi 120°C'da karıştırmışlardır. Hazırladıkları bu numune ile 150°C'da hazırladıkları BSK örnekleri üzerine disk şekilli kompakt çekme deneyi (disk-shaped compact tension-DC(T)) uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, Evotherm® ile hazırlanan numunelerin BSK'larla hazırlanan numunelere göre ısı çatlaklarına karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Hurley ve Prowell (2005, 2006) organik, kimyasal ve sentetik zeolit IKA katkıları kullanarak hazırladıkları karışımlarda, düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının bitümün başlangıçtaki yaşlanma değerlerini düşürdüğünden karışımın ısı çatlaklarına karşı dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir.

D'Angelo ve ark. (2008) yukarıda bahsi geçen verilerle benzer sonuçlar elde etmiştir. Buna göre, serim sonrası tüm IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü kaplamalar için kısa dönem ısı çatlaklarına karşı direnç BSK'larla benzer ya da daha iyi sonuç vermektedir.

ABD'nin Minnesota Eyaleti'nde, kimyasal IKA katkılardan biri olan Evotherm® kullanılarak deneysel saha uygulamaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilenlere göre, IKA üretim ve sıkıştırma sıcaklıklarının BSK'lara göre daha düşük olması nedeniyle bitümdeki yaşlanma etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, IKA katkıları ile hazırlanan bitüm örneklerinin düşük ısılarda saf bitümlere göre daha sünek (düktil) olduğu belirlenmiştir. Bu durum, IKA katkılarının sünekliliği (düktilite) olumlu yönde geliştirdiğini kanıtlamaktadır (MeadWestvaco, 2009).

Kvasnak ve ark. (2010) dört farklı IKA katkısı (Sasobit®, Advera® WMA, Double Barrel® Green ve Evotherm®) kullanarak düşük sıcaklık çatlaklarına etkisini değerlendirmişlerdir. Tekrarlı yükleme deneyi (repeated loading test-AASHTO T 322) ile elde edilen sonuçlara göre, Sasobit® ve Advera® WMA ile hazırlanan bitüm örneklerinde sünme uyumluluğu (creep compliance) değerleri kontrol numunelerine göre daha düşüktür. Bu nedenle, bahsi geçen bu iki IKA katkısı düşük sıcaklık çatlaklarına daha az dayanıklıdır. Diğer yandan, Double Barrel® Green ve Evotherm® ile hazırlanan bitüm örnekleri için sünme uyumluluğu değerleri kontrol numunelerine göre daha yüksektir. Sonuç olarak Kvasnak'a göre, Double Barrel® Green ve Evotherm® içeren bitümlü karışımlarda termal gerilmeyi azaltmakta ve düşük üretim sıcaklıklarında dahi düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnç artmaktadır.

Cooper III ve ark. (2011) Thiopave® ile hazırlanan bitüm örneklerinin düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımını değerlendirmek amacıyla çalışmalar

yapmışlardır. Bu amaçla birinci grup, olarak PG 70-22 sınıfına ait saf bitüme elastomer (SBS) ilavesi yapmışlardır. İkinci grup deney numunesi ise Thiopave® IKA katkısı içeren PG 64-22 sınıfı bitüm örneklerinden oluşmaktadır (IKA katkısı bitüme ağırlıkça %40 oranında ilave edilmiştir). Termal gerilme önleyici numune deneyi (thermal stres restraining specimen test – TSRST, AASTO TP 10) ile yapılan çalışmada numuneyi iki adet alüminyum plakanın arasına yerleştirilmiş ve bitüm kırılana kadar soğutulmuştur. Deney sonucunda, SBS içeren saf bitüm örneği IKA katkı ile hazırlanan bitüm örneğine göre yaklaşık 14 °C daha düşük sıcaklıkta kırılmıştır. Bunun nedeni, Thiopave® IKA katkısının yapısındaki sülfürün sertliği arttırmasıdır.

Jones ve ark. (2011) Aquablack® köpüklendirme yöntemini kullanarak düşük sıcaklık çatlakları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla, kritik sıcaklık analizi (critical temperature analysis) olarak bilinen bir yöntem kullanmışlardır. Kritik sıcaklık, bir numunenin düşük sıcaklıklardaki performansını değerlendirmek amacıyla belirli bir sıcaklıktaki tahmini ısıl gerilmesinin indirekt çekme mukavemetini aştığı sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Plentte üretilen, saf ve IKA katkılı dört numune ile yapılan çalışmada ilk numune ısıl gerilmenin belirlenmesi için önem arz eden parametrelerin belirlenmesi amacıyla sünme uyumluluğu deneyine (creep compliance test), diğer üç numune ise indirekt çekme mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilenlere göre, saf ve IKA katkılı bitüm örneklerinin kritik sıcaklıkları sırası ile -25°C ve -25,6°C'tir. Buradan da anlaşılacağı üzere, saf ve IKA katkısı ile hazırlanan bitüm örneklerinin düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci birbirlerine yakındır.

Sonuç olarak yapılan çalışmalardan elde edilenler ışığında, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnç IKA katkısı ve kullanılan teknolojilere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

4.3.5.5 Neme Karşı Duyarlılığa Etkisi

IKA'larda neme karşı duyarlılık en önemli değerlendirme alanlarından bir tanesidir. Özellikle su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesinin ya da bitüme doğrudan su enjeksiyonu yönteminin kullanıldığı teknolojilerde neme karşı duyarlılığın öncelikli olarak belirlenmesi gerekmektedir. IKA'larda karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları BSK'lardan daha düşük olduğundan karışımda kullanılan agregaların uygun bir şekilde kurutulması her zaman mümkün olmayabilmektedir (Kvasnak ve ark., 2009). Bu durumda, agrega içerisinde kalan nem bitüm – agrega arasına girerek bağı koparmakta ve soyulma olayına neden olmaktadır (Bower ve ark., 2012).

Hurley ve Prowell (2005, 2006) IKA'ların neme karşı duyarlılığının tespiti için üç farklı katkı (Sasobit[®], Aspha-min[®] ve Evotherm[®]) ile deneyler yapmışlardır. Bu çalışma sırasında neme karşı duyarlılığın azaltılması için soyulma önleyici katkılar da kullanmışlardır. İki farklı agrega türü (granit ve kalker) kullanılarak yapılan bu çalışmada, neme karşı duyarlılığın belirlenmesi amacıyla çekme mukavemet oranı (TSR) ve Hamburg tekerlet izi deneyleri uygulanmıştır. Genel olarak, granit agregası ile hazırlanan IKA örneklerinin kontrol numunelerine göre neme karşı duyarlılıkları daha yüksektir. Aspha-min[®] ile hazırlanan bitüm örneklerine sönmüş kireç ilavesi numunelerin neme karşı duyarlılıklarında önemli ölçüde düşüşe neden olmuştur. Benzer durum, Sasobit[®] ile hazırlanan bitüm örnekleri için de geçerlidir.

Xiao ve ark. (2009) Aspha-min[®] ve Sasobit[®] ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerinde uyguladıkları deneysel çalışmalarda, içeriklerinde farklı oranlarda su muhteva eden agregalar kullanmışlardır. Numunelerin neme karşı duyarlılıklarının belirlenmesi amacıyla indirekt çekme mukavemeti ve sertlik değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre, agregaların temin edildiği kaynaklara bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermekle birlikte, nemli agregaların tamamında neme karşı duyarlılığın kontrol numunesine göre yüksek olduğu, bunun karışıma sönmüş kireç ilavesi ile azaltılabileceği belirlenmiştir. Bunlara ek, olarak agreganın

fiziksel ve kimyasal özellikleri, karışımın soyulmaya karşı direnci üzerinde etkili bir rol oynayacağı belirtilmiştir.

Kvasnak ve ark. (2009) Evotherm[®] katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde neme karşı duyarlılık değerlendirmesi yapmışlardır. Bu amaçla, üç farklı parametre (TSR, indirekt çekme deneyi ile emilen enerji oranı ve soyulma noktası) üzerinde durmuşlardır. Laboratuvar koşulların ve asfalt plentinde hazırladıkları örnekler için, laboratuvarda hazırlanalar tüm bu belirtilen üç parametrede de başarısız olmuşlardır. Bunun nedeni olarak, mikserde uygun bir karışımın hazırlanamadığı belirtilmiştir. Asfalt plentinde hazırlanan örnekler ise tüm neme karşı duyarlılık deneylerinde şartname limitleri içerisinde kalmış ve başarılı olmuşlardır. Her ne kadar tüm deneylerde şartname limitleri içerisinde kalınmış olsa da IKA katkılar ile hazırlanan örneklere ait TSR değerleri BSK'lara göre daha düşüktür.

Williams ve ark. (2011) dört farklı IKA katkısı (Evotherm[®], Revix[®], Sasobit[®] ve Double Barrel[®] Green) ile iki farklı sıkıştırma (hem sahada hem de laboratuvarda) uygulaması kullanarak uyguladıkları deneylerde, IKA katkılar ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerine ait TSR değerlerinin BSK'lar ile hazırlanan örneklere oranla daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ancak, Double Barrel[®] Green yöntemi kullanılarak sahada sıkıştırılan örneklerin TSR değerleri kontrol numunelerine göre daha yüksektir.

Kvasnak ve ark. (2010) Ultrafoam GX[®] ile yaptıkları deneysel çalışmalarda, neme karşı duyarlılığın tayini için AASHTO T283 yöntemini kullanmışlardır. Kuru ve koşullandırılmış örnekler ile yapılan bu çalışmada, IKA ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinin indirekt çekme mukavemeti (ITS) değerleri 0,76 iken, saf bitüm ile hazırlana örneklere ait değer 0,94 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, IKA katkısı içeren örnekler şartname limiti olan 0,80'in bir miktar altında kalmıştır. Ayrıca, deney sonrası kırılarak içlerine bakılan IKA numunelerinde soyulma gözlemlenirken, saf bitüm ile hazırlanan örneklerde bu duruma rastlanmamıştır.

Sonuç olarak, İKA’larda neme karşı duyarlılık oldukça önemli bir problemdir. Genel itibariyle, soyulma önleyici katkıları bu probleme bir çözüm getirirse de karışımın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde meydana getireceği etkiler iyice değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, belirtilen durum üzerine daha fazla araştırma ve çalışma yapılmalıdır.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ALETLER VE DENEY YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, tez kapsamında İKA katkıları ile hazırlanan bitümlü bağlayıcılar üzerine yapılan deneysel çalışmalara ait yöntemler ve içerikleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir.

5.1 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Aletler

5.1.1 Geleneksel Bitüm Deneyleri

5.1.1.1 Penetrasyon Deneyi (ASTM D5, TS EN 1426)

Penetrasyon deneyi ile bitümlü malzemelerin sertlik veya kıvamlılıkları tayin edilir. Deneyde, standart bir iğnenin belirli bir yük altında ve belirli bir süre içinde, asfalt numunesi içerisine dikey olarak batma mesafesidir ölçülür. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar (Keçeciler ve ark., 1988). Şekil 5.1’de penetrasyon deneyi cihazı verilmektedir.



Şekil 5.1 Penetrasyon deneyi seti

5.1.1.2 Yumuşama Noktası Deneyi (ASTM D36, TS EN 1427)

Değişik ham petrolerden üretilmiş asfaltların ısı değişimlerine karşı olan duyarlılıkları farklıdır. Bu duyarlılıkları ölçmek için en kısa ve en basit yöntem yüzük ve bilye yöntemi ile yumuşama noktasının bulunmasıdır (Şekil 5.2). Bu yöntem ile yumuşama noktası, bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilye bulunan, standart bir kalıp içerisindeki bitümlü maddenin belli bir hızla ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometrede okunan değerdir (Keçeciler ve ark., 1988).



Şekil 5.2 Yumuşama noktası deneyi cihazı

5.1.1.3 İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (ASTM D1754, TS EN 12607-2)

Bu deney ısının ve havanın, yarı katı asfaltik maddeler üzerindeki etkilerini belirlemede kullanılır. Deney, bitümün silo halinde bekletilmesi sırasında hava tesiri ile yaşlanmasını laboratuvar ortamında temsil etmek amacı ile geliştirilmiştir. İnce film halinde ısıtma deneyi, 3,2 mm kalınlığındaki bir asfalt filminin, 5 saat süre ile 163°C sıcaklıktaki döner tablalı bir etüvde ısıtılmasından sonra, deneyden önceki ve sonraki ağırlık ile penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerindeki değişimin belirlenmesini sağlar (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 İnce film halinde ısıtma deney cihazı

5.1.1.4 Depolama Stabilesi Deneyi (TS EN 13399)

Depolama stabilesi deneyi, bitüm modifikasyonunda kullanılan katkılar ile bitüm arasındaki uyumluluğun bir ölçüsüdür. Bu deneyde 32 mm çapında ve 160 mm yüksekliğinde silindir kabın içine konulan katkılı bitüm örneği, 163°C'daki etüv içinde 72 saat süre ile bekletilmektedir. Deney sonunda etüvden çıkarılan silindirik örnek oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Depolama stabilesi, silindirik numunenin altından ve üstünden alınan örnekler üzerinde uygulanan yumuşama noktası deneyi sonuçları ile belirtilmektedir.

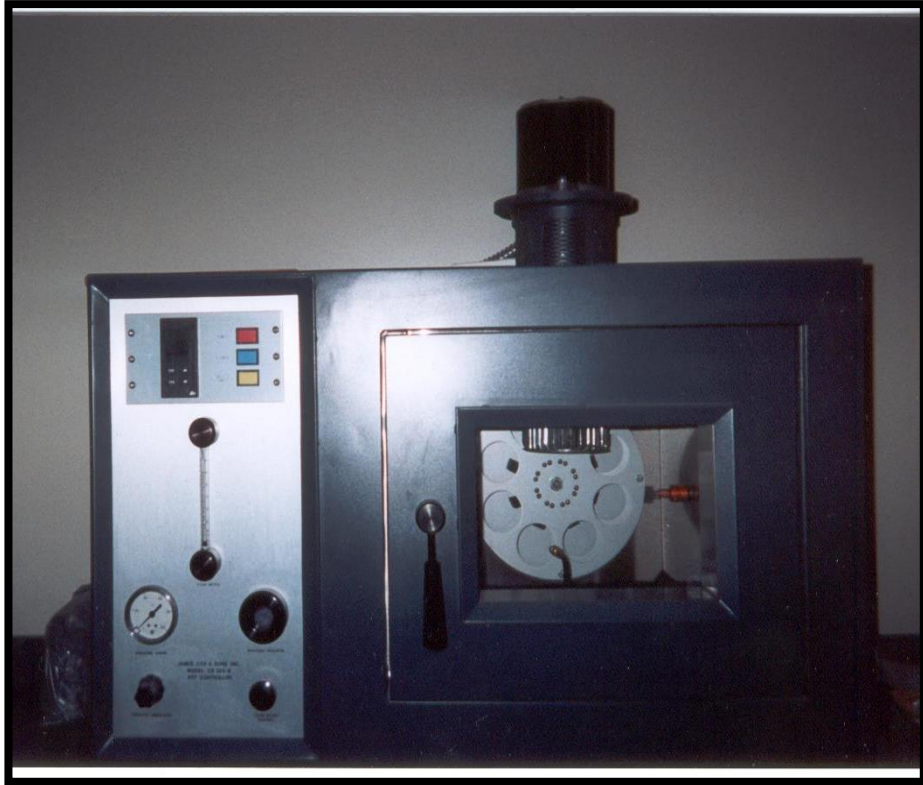
İki kesit için çıkan sonuçlar arasındaki farkın şartname sınırları altında kalması gerekmektedir.

5.1.1.4 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (ASTM D2872, ASHTO T240)

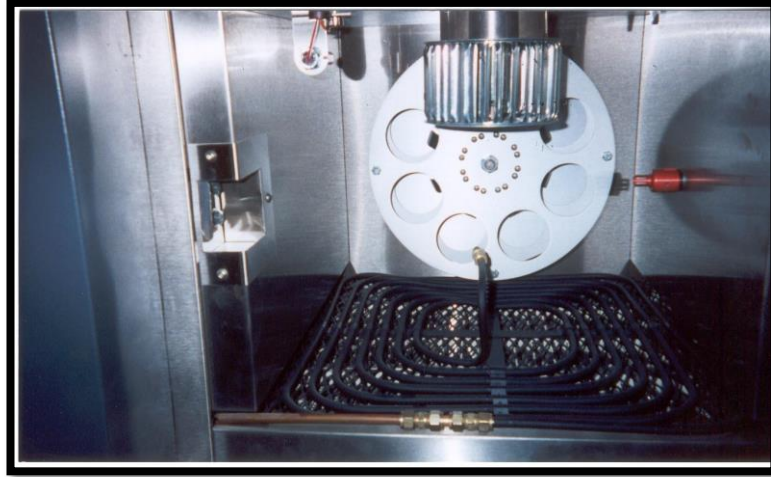
Bu yöntem iki amaca hizmet etmektedir. Bunlardan biri asfalt üzerinde bu işlemden sonra uygulanacak deneylere belli ölçüde yaşlanmış numune temin etmek,

diğeri ise bu işlem sırasında asfalt içinde buharlaşan ktle miktarını saptamaktır. Buharlaşan ktle miktarı, asfaltın, karıştırma ve serme işlemleri sırasında oluşabilecek yaşlanmasının bir göstergesidir.

Plentteki harmanlama ve karıştırma işlemi ile serim sırasında, yüksek sıcaklık ve hava akışı etkisi altında asfalt bağlayıcı yaşlanmaktadır (kısa dönem yaşlanma). Amerika Birleşik Devletleri'nde SHRP bünyesinde uygulamaya konulan SUPERPAVE (SUperior PERforming Asphalt PAVEments) asfalt şartnamesi bu olayı temsil eden Döner İnce Film Etv Deneyi'ni gerekli görmektedir (Asphalt Institute, Superpave Series No.1, 1996). Bu yöntemin amacı, işlem sırasında asfalt içinde buharlaşan ktle miktarını saptamaktır. Etüv, dairesel bir taşıyıcıya sahiptir. Bu taşıyıcı düşey yönde yerleştirilmiş olup, kendi eksenini etrafında dönebilmektedir. şekil 5.4 ve şekil 5.5'te Dönel İnce Film Etüv Aleti'nin genel görünüşleri verilmektedir.



şekil 5.4 Dönel ince film etüv aleti-genel görünüş



Şekil 5.5 Dönel ince film etüv aleti-iklimlendirme haznesi

Etüv, düşey ve kendi eksenini etrafında dönen bir taşıyıcıya sahiptir. Taşıyıcının içine yatay olarak 8 adet şişe yerleştirilmiştir. Şişeler, taşıyıcı ile birlikte dönerken en alt konuma geldiklerinde hava üfleyici parça ile her bir şişenin içerisine hava püskürtülmektedir. Şişelerin ikisi kütle kaybının belirlenmesinde, diğerleri ise basınçlı oksidasyon kabı deneyinde kullanılmaktadır.

Etüv kullanılmadan önce 6 saat boyunca uygulama sıcaklığı olan 163°C'ye kadar ısıtılmıştır. Asfalt numuneleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra yaklaşık 10 dakika içinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde termostat ayarlanmıştır.

Deneyde asfalt, 150°C'yi geçmeyecek şekilde ısıtılmış ve her bir şişeye 35 gram numune konulmuştur. Kütle kaybını ölçmek amacıyla şişeler 0,001 duyarlılıkla tartılmıştır.

Şişeler taşıyıcıya yerleştirildikten sonra 85 dakika ve dakikada 15 tur yapacak şekilde döndürülmüşlerdir (hava üfleme düzeneği dakikada 4000 ml olacak şekilde ayarlanmıştır).

Yaşlandırma işlemi sonunda kütle kaybı tespitinde kullanılacak numuneler soğutulmuş ve aynı duyarlılıkla tartılmışlardır.

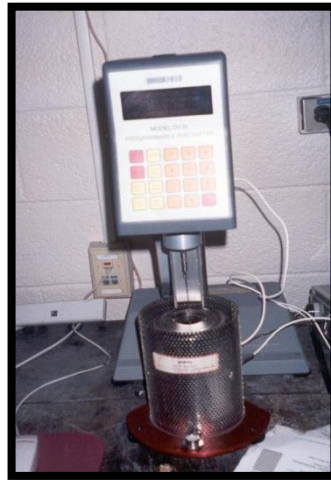
$$\%Kütle\ Kaybı = \frac{(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle})}{\text{İlk Kütle}} * 100 \quad (5.1)$$

5.1.2 Brookfield Dönel Viskozite Deneyi (ASTM D4402, AASHTO TP 48, TS 117)

Bu deney, bağlayıcının sıcak karışım tesisinde pompalanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. İlk olarak bağlayıcı için uygun bir silindirik çubuk seçilmiştir. Dönel viskozite, bu silindirik çubuğun sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir.

Ortak eksenli döner bir silindire sahip olan viskometre, farklı özellikteki bağlayıcıların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 5.6). Kılcal tüp viskometrelerin tersine, bu aletin hem modifiye hem de normal bağlayıcılar ile kullanılabilmesi mümkündür.

Viskoziteyi ölçen alet, Brookfield viskometre ve Termostel olmak üzere 2 ana parçadan oluşmaktadır. Brookfield viskometre, bir motor, silindirik çubuk, kontrol tuşları ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Motor, çubuğun kendi eksenini etrafında dönmesini sağlayan kuvveti üretmekte ve şartnameye göre 20 devir/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Termosel sistemi ise, ısı kontrollü taşıyıcı, numune kabı ve sıcaklığı kontrol altında tutan bir parçadan oluşmaktadır. Numune kabı paslanmaz çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Isı kontrollü taşıyıcı, numune kabını içine almakta olup ısıtıcı elemanlara sahiptir. Bu elemanlarla deneyin 135°C'de uygulanması sağlanmaktadır.

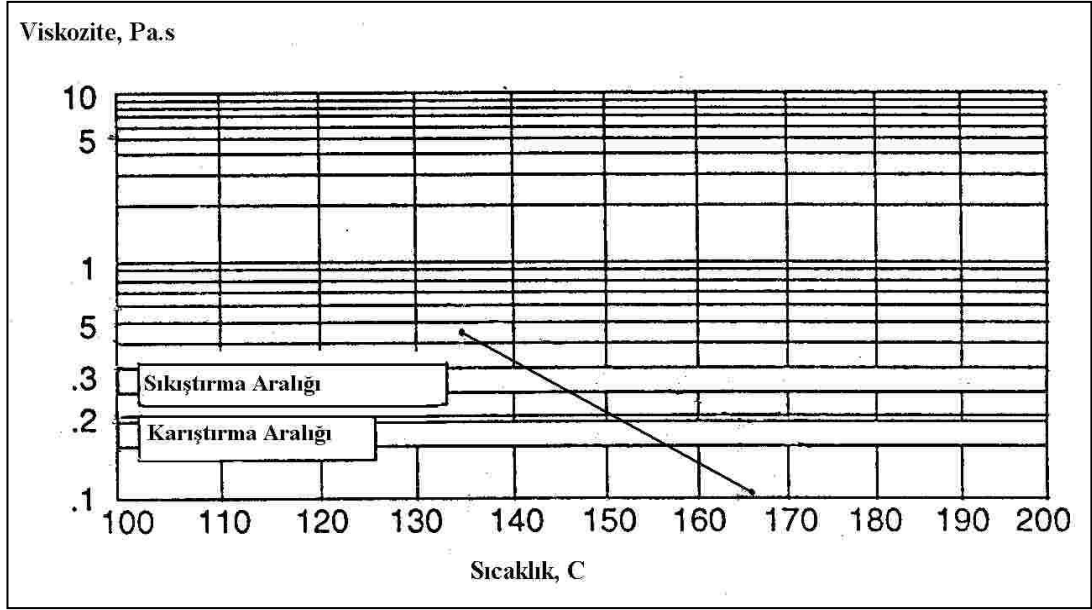


Şekil 5.6 Dönel viskometre deney aleti

Dönel viskozite, sabit bir sıcaklıkta silindirik bir çubuğun asfalt numunesi içinde kendi eksenini etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Bu burulma kuvveti, viskometre tarafından otomatik olarak ölçülen asfalt viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu deney sonuçları, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının tahmininde kullanılan sıcaklık-viskozite tablosunun hazırlanmasında kullanılmaktadır.

Etüvde 150°C'nin üzerinde olmamak şartıyla 30 gr asfalt, sıvı hale gelinceye kadar ısıtılmış ve belli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabı ile tartılmıştır (Numune ağırlığı, silindirik çubuğun boyutuna göre 8-11 gr arasında değişmektedir). İçinde asfalt bulunan numune kabı, önceden belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış ısı kontrollü bir taşıyıcının üstüne, ardında da silindirik çubuk, numune içine yerleştirildikten sonra viskometreye takılmıştır. 135°C'lik uniform bir sıcaklığa ulaşıncaya kadar yaklaşık 15 dakika beklenmiş, bu süre boyunca motor çalıştırılmış, viskozite ve dönme oranı gözlenmiştir. Numune sıcaklığı dengeli duruma geldiğine ve viskozite okumaları sabitleşmeye başladığında deney ile ilgili bilgiler (deney sıcaklığı, viskozite, deney numarası ve dönüş sayısı) dijital göstergeden alınmıştır. Bir dakika ara ile üç viskozite okuması yapılmış ve okumaların ortalamaları alınmıştır.

Asfaltların işlenebilirliğine viskozitenin etkisi, uygun karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti açısından oldukça önemlidir. AASHTO T 312-01'e göre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenebilmesi için istenilen viskozite değerleri sırasıyla 170±20 mPa.s ve 250±30 mPa.s'dir (Ashalt Institute, 1997). Tez kapsamında kullanılmak üzere belirlenen İKA katkıları için 135 ile 160°C sıcaklıklarda yapılan viskozite deneyleri sonucunda bu değerlere karşılık gelen sıcaklıklar, o katkıların sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarını vermektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Karıştırma–sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan viskozite grafiği

5.1.3 Dinamik Kayma Reometresi (DSR-AASHTO T315, TS EN 14770)

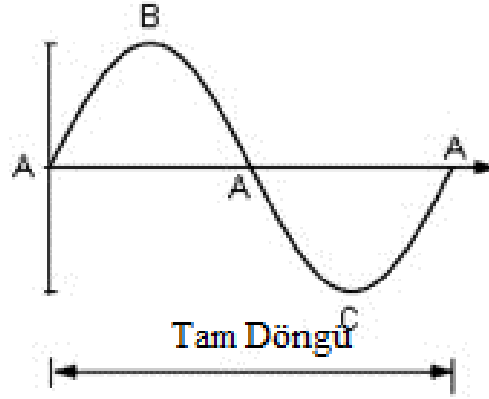
Dinamik Kesme Aleti, bağlayıcı davranışının yükleme süresi ve sıcaklıkla ilişkisi dikkate alınarak SHRP tarafından geliştirilmiştir. Bu alet kullanılarak bitümlü bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ) gibi reolojik özellikleri ölçülmektedir. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna ve yorulmaya karşı dayanımları belirlenmektedir.

AASHTO T5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanım limitleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 DSR deneyinde kullanılan bitümlü bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri

Bağlayıcı Türü	Parametreler	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	$G^*/\sin\delta$	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	min. 1,0 kPa
RTFOT	$G^*/\sin\delta$		min. 2,2 kPa
PAV	$G^* \times \sin\delta$	Yorulmaya karşı dayanım	min. 5000 kPa

Bağlayıcı, biri sabit, diğeri sağa ve sola küçük salınım hareketleri yapan iki paralel plaka arasına yerleştirilmektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 DSR cihazının salınımına ait tam döngü

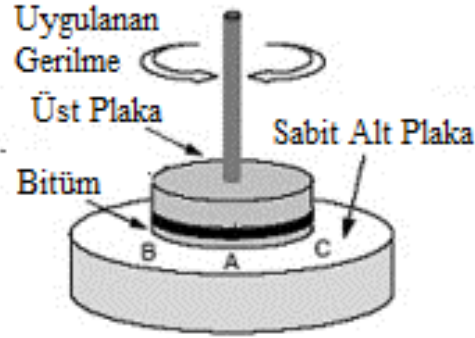
Doğru numune kalınlığı bu iki plaka arasındaki boşluğun ayarlanmasıyla elde edilmektedir. Deneilerde boşluk yüksekliğine göre iki ayrı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve boşluk yükseklikleri bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilmektedir (RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda 1000 mikron boşluk ve 25 mm çaplı plaklar; PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda ise, 2000 mikronluk boşluk ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır).

Dinamik kesme deneyi, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülünü ve faz açısını ölçerek hem viskoz hem de elastik davranışını belirlemektedir. G^* , sürekli tekrar eden kesme gerilmeleri altında oluşan deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. δ ise, viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir.

Tez kapsamında uygulanan DSR deneylerinde, Şekil 5.9'de görülen Bohlin Gemini 2 dinamik kayma reometresi kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce bağlayıcı, akıcı hale getirilinceye kadar ısıtılmış ve uygun numune kalınlığı elde etmek üzere plakalar arasına yerleştirilmiştir (Şekil 5.10). İki plaka arasından taşan kısımlar özenle temizlendikten sonra gerekli boşluk değeri ayarlanmıştır.



Şekil 5.9 DSR cihazı ve aparatları



Şekil 5.10 DSR cihazında bitümün durumu

Deney, 1000 μm aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılarak salınım hızı 10 rad/sn (1,59 devir/sn) frekansta gerilme kontrollü olarak yapılmış olup, orijinal numunelere 120 Pa, yaşlandırılmış numunelere 220 Pa sabit gerilme uygulanmıştır. Isıtılan bitüm örnekleri, silikon kalıplara dökülerek, 10-15dk boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Soğuyan IKA katkılı bitüm örnekleri silikon kalıplardan çıkartılarak DSR cihazına ait alt ve üst plakalar arasına yerleştirilmiştir. DSR cihazına ait üst plaka, 1050 μm seviyesindeyken bitüm örneklerinin taşan kısımları özenli bir şekilde temizlenmiştir. Bu işlemin ardından, alt ve üst plakalar arasındaki mesafe 1000 μm 'ye ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. Deney sonucunda, saf bitüme

ait orijinal ve yaşlandırılmış bitüm örnekleri ile farklı IKA katkı ve içeriklerde hazırlanan bitüm örneklerinin farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçlarına göre G^* , δ ve “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişim grafikleri belirlenmiştir.

5.2 Bitümlü Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Aletler

5.2.1 Marshall Karışım Tasarımı (ASTM D-1559, TS EN 3720)

Bitümlü karışımlarda tasarım, sağlam (durabil) bir üstyapı elde gerekli bitüm miktarını bulabilmek, trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterlikte karışım stabilitesini oluşturabilmek, sıkıştırılmış karışımda kasma, akma ve stabilite düşüklüğü olmaksızın trafik tarafından oluşturulacak çok az miktardaki sıkışmaya imkân verecek, ancak karışım içinde nem ve fazla hava barındırmayacak ölçüdeki boşluğu sağlamak, karışım içerisindeki agregaların segregasyona uğramadan uygun serim yapılacak şekilde işlenebilirliği verecek, ekonomik bir karışım ve agrega gradasyonu belirlemek amacıyla yapılır.

Sıkıştırılmış bitümlü kaplamalarda karışım analizi için ilk olarak, kaba ve ince agreganın hacim özgül ağırlıkları (G_{kb} ve G_{ib}) bulunarak, karışımda kullanılacak olan mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı (G_{fa}) ile bitümün özgül ağırlığı tayin edilir. Bunlara ek olarak, bitümlü karışım içerisindeki agrega karışımının hacim özgül ağırlığı hesaplanır. Daha sonra, gevşek kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı bulunarak, sıkıştırılmış bitümlü karışımın hacim özgül ağırlığı tayin edilir.

Sonraki aşamalarda ise, agreganın efektif özgül ağırlığı (G_{ef}), agreganın bitüm absorpsiyonu (P_{ba}), bitümlü karışımın efektif bitüm miktarı (P_{be}), sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), sıkıştırılmış bitümlü karışım içindeki hava boşluğu yüzdesi (V_h) ve sıkıştırılmış bitümlü karışımın asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) bulunur.

Bitümlü kaplamaların laboratuvar koşullarında Marshall karışım tasarımı yapılırken, “*Marshall Aletini Kullanarak Bitümlü Karışımların Plastik Akmaya Karşı Direnci İçin Standart Deney Yöntemi (ASTM D-1559)*” kullanılmaktadır (Önal ve Kahramangil, 1993).

Bu deney yönteminde, her bir agrega ve bitüm yüzdesi kombinasyonu için en az üç deney numunesi hazırlanmaktadır. Deney kapsamında kullanılacak olan agrega karışımı $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. Bu işlemden sonra belirlenen gradasyona göre hazırlanan agrega karışımları (yaklaşık 1150 gr.) ayrı tepsilere konularak karıştırma sıcaklığına erişmesi için etüvde bir süre bekletilir. Karıştırma sıcaklığına gelen bitüm ile agregalar karıştırma kabına konularak iyice (agregalar bitümle tamamen kaplanana kadar) karıştırılır.

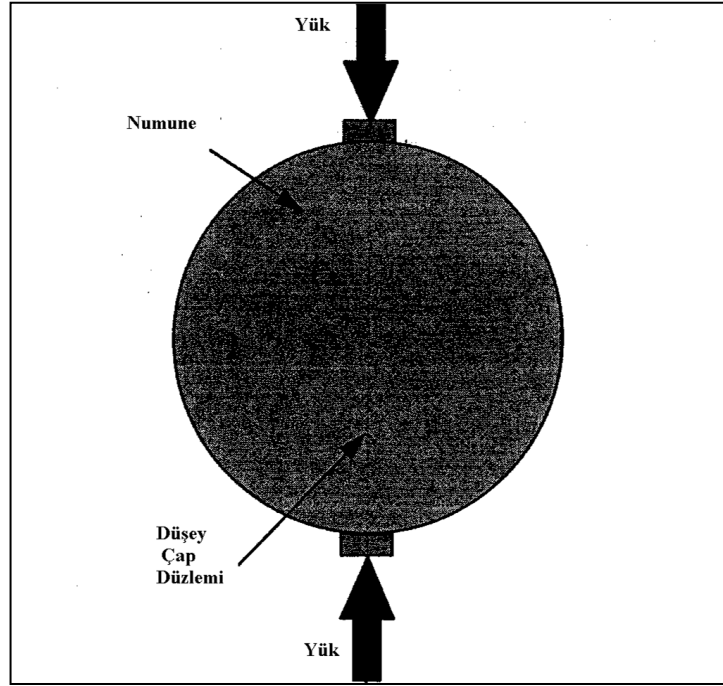
Karıştırma işleminin ardından elde edilen bitüm-agrega karışımı, 101,6 mm çapında ve 76,2 mm yüksekliğindeki Marshall kalıplarına konur. Belirlenen sıkıştırma sıcaklığına kadar soğuyan karışım, Marshall kompaktörüne yerleştirilerek, her iki yüzüne de Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KTŞ) belirtilen Aşınma Tabakası Tip-1 için 75’er darbe vurulur (KTŞ, 2013). Sıkıştırma işleminden sonra oda sıcaklığına kadar soğutulan numune Marshall kalıbının taban plakası ile üst yakası çıkarılarak krikoya yerleştirilir ve numuneye zarar vermeden kalıptan çıkarılır. Boyları ve çapları kumpas yardımıyla ölçülen numunelere ait havada, suda ve doygun yüzey kuru ağırlıkları (DYKA) belirlenir.

Deney yapılmadan önce numuneler, istenilen ölçüm sıcaklığına getirilmek amacıyla 60°C sıcaklığındaki su banyosunda 30-40 dakika süresince bekletilir. Bu süre sonunda numuneler su banyosundan çıkarılarak kurulanır ve Marshall test cihazına ait kırma kafasına yerleştirilir. Akma çubuğu da (flowmetre) kırma kafası üzerindeki yerine yerleştirilerek cihaz çalıştırılır. Cihazın yükleme hızı 50,8mm/dak. olmalıdır. Deney, cihaz ekranındaki stabilite ve akma değerleri sabit hale gelene kadar devam eder. Tüm bu işlemlerin 30 saniyelik süre zarfında özenle yapılması gerekmektedir. Deney sonunda stabilite ve akma okumaları yapılarak veriler kaydedilir.

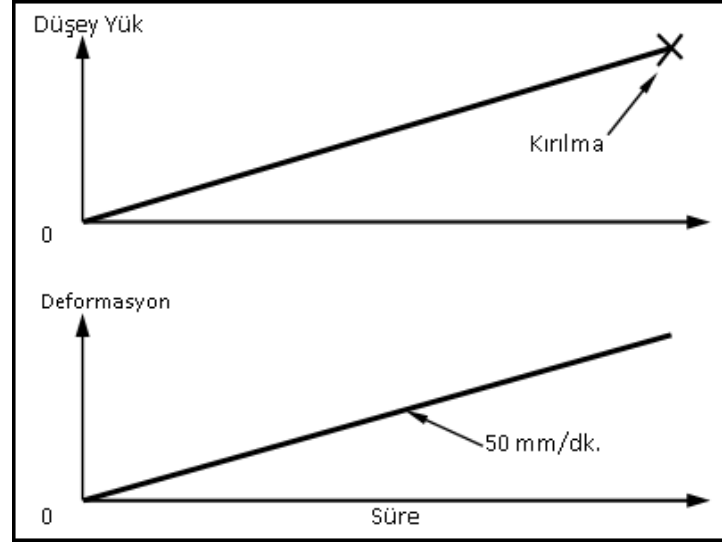
5.2.2 İndirekt Çekme Deneyi

Trafik yükleri altındaki üstyapı tabakalarında ortaya çıkan gerilme ve birim şekil değiştirmelerin tahmini için, üstyapıyı oluşturan malzemelerin gerilme-birim deformasyon davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Tekerlek yükü nedeniyle ortaya çıkan bu deformasyon kalıcı olmayıp, büyük bir bölümü geri gelen deformasyondur.

İndirekt Çekme Gerilmesi deneyi, silindirik asfalt numunesi üzerine düşey çap düzlemine dik olarak bir basınç uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Deney sırasında, dakikada 51 mm yükleme hızına sahip Marshall test başlığı kullanılmıştır. Bu deneye ait şekil ve grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).



Şekil 5.11 İndirekt çekme gerilmesi deneyine ilişkin yükleme şekli (Kennedy ve ark., 1997)



Şekil 5.12 İndirekt Çekme gerilmesi deneyine ilişkin yük-deformasyon özellikleri (Kennedy ve ark., 1997)

Deneyden elde edilen yük değeri, aşağıdaki formülde yerine konularak indirekt çekme mukavemeti değeri bulunmuştur.

$$S_T = \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot h_k \cdot D} \quad (5.2)$$

Burada;

P =Uygulanan maksimum Yük, kg (veya lb.)

h_k =Numune yüksekliği, cm (veya inç)

D =Numune çapı, cm (veya inç)

S_T =İndirekt çekme mukavemeti, MPa veya (psi)

5.2.3 Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Dirençlerinin Saptanması (AASHTO T283, TS EN 12697-12)

Bu deney, laboratuarda sıkıştırılmış bitümlü karışımların hızlandırılmış su etkileri nedeni ile oluşan çap düzlemindeki indirekt çekme mukavemeti ölçümünü ve bu deney için numune hazırlanmasını kapsamaktadır.

Farklı İKA katkıları kullanılarak hazırlanan karışımlar alüminyum kap içine konularak 2 saat oda sıcaklığında soğutulmuşlardır. Sonra karışımlar kür edilmek üzere 16 saat süre ile 60°C'lik etüvde bekletilmişlerdir.

Kür işleminden sonra, 135°C'lik etüvde 2 saat bekletilmiş karışımlar, %7 ± 1,0 hava boşluğunda sıkıştırılmışlardır. Her bir İKA katkısına ait tüm yüzdelere için, üçer adet numune hazırlanmıştır.

Deney numuneleri hazırlandıktan sonra hava boşlukları yaklaşık eşit olacak şekilde farklı iki gruba ayrılmıştır. İlk grup kuru test edilmek üzere oda sıcaklığında plastik sızdırmaz torbalarda saklanmıştır.

Diğer grup ise aşağıdaki şekilde koşullandırılmıştır:

-Numune metal silindirik piknometre içine konulduktan sonra içine üzerine 25°C'de saf su ilave edilmiştir. Daha sonra 5-10 dakika süre ile 13-67 kPa vakum uygulanmıştır. Bu işlem sonunda numune yaklaşık 5-10 dakika su içinde bekletilmiş ve absorbe su hacmi aşağıdaki şekilde saptanmıştır.

$$J=B'-B \quad (5.3)$$

Burada;

J = Absorbe su hacmi, cm³

B' = Kısmi vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı, gr.

B = Kısmi vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı, gr.

-Absorbe su hacmi ile hava boşlukları karşılaştırılmış ve doymuşluk derecesi hesaplanmıştır.

$$S' = \frac{100*J}{I} \quad (5.4)$$

$$I = \frac{V_a * V}{100} \quad (5.5)$$

Yukarıdaki formülde;

S' = Doymunluk derecesi, %

J = Absorbe su hacmi, cm³

I = Hava boşluğu hacmi, cm³

V_a = Hava boşluğu yüzdesi

V = Numune hacmi, cm³

(Şartname uyarınca yukarıda hesaplanan doymunluk derecesinin, %70-%80 aralığında olması gerekmektedir. Eğer bu değer %70 ten küçük ise daha fazla vakum uygulanır ve/veya vakum süresi arttırılır, %80'den fazla ise numune hasar görmüş sayılmaktadır).

-Belirtilen ölçütler arasında doymunluk derecesi elde edildikten sonra, vakumla doyurulmuş numuneler plastik bir film tabakası içine sarılmış ve her biri içinde 10 ml su bulunduran plastik torbalara konulmuştur.

-İçinde numune olan plastik torba, 16 saat süre ile $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik dondurucu içinde bekletildikten sonra, 24 saat süreyle $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'lik su banyosuna alınmıştır.

-Bu işlemden sonra, numuneler 2 saat süre ile $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanmış su banyosunda bekletilmişlerdir.

-Kuru ve yukarıdaki şekilde koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilme değerleri saptanmıştır.

-Numunelerin neme karşı duyarlılıklarını saptamak için, koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmelerinin kuru numunelerin indirekt çekme gerilmelerine oranı bulunmuştur.

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, öncelikle deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan malzemeler ve özellikleri üzerinde durulacaktır. Farklı cins ve içeriklerde bitüme eklenerek kullanılması planlanan IKA katkıların hazırlanış işlemleri ele alındıktan sonra üretilen numunelerin geleneksel ve reolijik özellikleri tespit edilecektir.

Bitüm örnekleri kullanılarak hazırlanan karışımların mekanik özellikleri de ayrıntılı olarak incelenecektir.

6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu bölümde, ılık karışım asfalt örneklerinin hazırlanmasında kullanılan IKA katkıları, saf bitümün özellikleri ile IKA katkıları içeren bitümlü karışımların hazırlanmasında kullanılan agrega özellikleri verilmektedir.

6.1.1 Bitüm

Tez kapsamında bitümlü bağlayıcı olarak Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'den temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bağlayıcı kullanılmıştır. Saf bitümlü bağlayıcı üzerinde bağlayıcının özelliklerini tespit etmek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, viskozite, yanma ve parlama, ince film halinde ısıtma, ince film halinde ısıtma deneyi sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1'den de görüleceği gibi elde edilen deney sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitleri içinde kalmaktadır.

Tablo 6.1 Saf bitüm üzerine yapılan deney sonuçları

DENEY	STANDART	SONUÇLAR	ŞARTNAME LİMİTLERİ
Penetrasyon Deneyi (25°C; 0,1mm)	ASTM D5 EN 1426	55	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36 EN 1427	49	46-54
Viskozite (135°C)	ASTM D4402	412,5	-
Viskozite (160°C)	ASTM D4403	137,5	-
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (165°C; 5sa.)	ASTM D1754 EN 12607-1		
Kütle Değişimi (%)		0,04	0,5(maks.)
Penetrasyon Farkı (%)	ASTM D5 EN 1426	25	-
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36 EN 1427	54	48 (min)
Düktilite (25°C; cm)	ASTM D113	100	-
Özgül Ağırlık	ASTM D70	1,03	-
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92 EN 22592	260	230 (min)

6.1.2 Agregası

İKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda kaba agregası bazalt, incesi kalker olmak üzere iki farklı tip agregası kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan agregası malzemelerinden kalker ve bazalt agregaları Dere Madencilik A.Ş.'ne ait Belkahve/İzmir Taş Ocağı'ndan temin edilmiştir. Agregası özelliklerini belirlemek agregası grupları üzerinde özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sağlamlık yüzdesi, köşelilik deneyleri uygulanmıştır. Agregası özelliklerinin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğine ilişkin deneyler uygulandıktan sonra KTŞ'nde aşınma tabakaları için belirtilen aşınma Tip-1 gradasyon limitlerine göre elek analizi deneyi (ASTM C 136) uygulanmıştır. Agregası deney sonuçları Tablo 6.2'de, elek çaplarına göre seçilen gradasyon değerleri ile şartname limitleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.2 Kullanılan kalker ve bazalt agrega karışımının özellikleri

Test	Şartname	Sonuçlar		Şartname Limitleri
		Kalker	Bazalt	
Kaba Agrega Özgül Ağırlığı	ASTM C 127			
Hacim		2.686	2.666	-
Kuru Yüzey Doygun		2.701	2.810	-
Zahiri		2.727	2.706	-
İnce Agrega Özgül Ağırlığı	ASTM C 128			
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 C 131	24.4	14.2	maks. 45
Yassılık İndeksi (%)	ASTM D 4791	7.5	5.5	maks. 10
Sağlamlık Yüzdesi (%)	ASTM C 88	1.47	2.6	maks.10-20
İnce Agrega Köşelliliği	ASTM C 1252	47.85	58.1	min 40

Tablo 6.3 Elek çaplarına göre seçilen gradasyon değerleri

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 No.					ASTM C 136	
¾"	100	100	100	100		100
½"	35,7	100	100	90,5		83-100
3/8"	2,5	89	100	80,5		70-90
No 4	0,4	16	100	47,3		40-55
No 10	0,3	1,2	81	33		25-38
No 40	0,2	0,7	33	13,5		10-20
No 80	0,15	0,4	22	9		6-15
No 200	0,10	0,2	13	5,3		4-10

6.1.3 İlk Karışım Asfalt Katkıları

Tez çalışmaları kapsamında önceden de belirtildiği gibi üç farklı tür İKA katkısı kullanılmıştır. Bunlar organik, kimyasal İKA katkıları ile köpüklendirme yöntemleri içerisinde yer alan sentetik zeolit ve doğal zeolit İKA katkılarıdır.

6.1.3.1 Organik Katkı (Sasobit®)

Bu malzeme daha önce belirtildiği gibi Güney Afrikalı Sasol Wax tarafından üretilmekte ve “modifiye edici” veya “asfalt akış düzenleyicisi” olarak tariflenmektedir. Organik IKA katkısı, Fischer – Tropsch (FT) işlemi ile kömürün karbonizasyonu sırasında elde edilen, ince kristalize, uzun alifatik bir hidrokarbondur. FT parafin mumu olarak da bilinir.

Organik IKA katkısı üreticileri, doğal olarak oluşan bitüm esaslı mumlar ile FT mumlarının yapıları ve fiziksel özellikleri göz önüne alındığında aralarında oluşan farklılıkları özellikle vurgulamaktadırlar. Bu farklılıklar, FT mumlarının daha uzun zincir ve ince kristalize yapılarından kaynaklanmaktadır. Organik IKA katkısındaki hidrokarbonların baskın zincir uzunlukları 40 ile 115 karbon atomu aralığındadır. Asfaltta doğal olarak bulunan bitümlü parafin mumlarının zincir uzunlukları ise 22 ile 45 karbon atomu arasında olup, erime noktalarının FT mumlarına göre daha düşük olmasına nedeni budur.

Üretici firma Sasol Wax’a göre erime noktası 98 °C olan organik IKA katkısı, 115°C sıcaklıktaki bitümün içerisinde tamamen çözünebilmektedir (Walker, 2009; Corrigan, 2008). Bitümün viskozitesini düşürerek, üretim sıcaklığının 10 ile 50 °C arasında düşmesine imkân sağlar. Sıcaklık erime noktasının altına düştüğünde ise FT mum kristalize olarak kafes bir yapı oluşturur ve karışımın stabilitesini artırır. Yapılan çalışmalarda organik IKA katkısının yol trafiğe açıldıktan sonra kaplamada meydana gelen tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı saptanmış, sıkıştırımayı kolaylaştırdığı tespit edilmiştir. 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. Laboratuvar ortamında yapılacak deneysel çalışmalarda bitüm ile organik IKA katkısının basit bir karıştırıcıyla karıştırılabileceği ve bu işlem için yüksek kesmeli karıştırıcıya (high shear mixer) gerek olmadığı belirtilmiştir (Corrigan, 2008).

Deneysel çalışmalar kapsamında organik sınıfta incelenen Sasobit® katkı, üretici firmanın görüşleri ve yapılan ayrıntılı literatür çalışmalarının ışığında, bitüme ağırlıkça % 2, % 3 ve % 4 içeriklerinde eklenmesi uygun görülmüştür.

6.1.3.2 Kimyasal Katkı(*Rediset*® WMX)

Kimyasal IKA katkısı, karışım ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşüren, neme karşı duyarlılığı azaltan bir çeşit IKA katkıdır. Bu katkı, geleneksel bitümlü sıcak karışımlara göre üretim sıcaklığında yaklaşık olarak 33°C'lık bir azalma meydana getirir. Bu azalma ile birlikte harcanan yakıttan % 20 oranında tasarruf sağlanırken, karbon dioksit emisyonlarında da azalmaya neden olur. Bunlara ek olarak, düşük sıcaklıktaki karışım ve sıkıştırma sayesinde duman, is ve koku en aza indirgenerek yol yapımında çalışanların da doğabilecek olumsuzluklardan etkilenmeleri de minimum düzeyde tutulur. Kimyasal IKA katkısı, küçük granüller tanecik yapıdadır. Bu katkı, direkt olarak bitüme katılır ve daha sonra agrega ile karıştırılır. Asfalt plantinde sonradan hiçbir aparat eklenmesine gerek yoktur. %1,5 ile 2 oranında bitüme eklenen katkı için yeni bir karışım tasarımı veya bitümün penetrasyon sınıfının değiştirilmesine gerek yoktur (Walker, 2009).

Kimyasal IKA katkısı, bitümün kohezyonunu artırır, tekerlek izi oluşumunu azaltır. Ayrıca, kimyasal IKA katkısı soyulma önleyici bir katkı olduğundan, neme karşı hassasiyeti azaltarak kaplamanın servis ömrünün uzamasına da yardımcı olur (Brown, 2008).

Kimyasal sınıfta incelenen IKA katkısı bitüme ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3 oranlarında kullanılması uygun bulunmuştur.

6.1.3.3 Köpüklendirme Yöntemleri için Kullanılan Katkılar (Zeolitler)

Zeolit, alkali toprak katyonları içeren, kristal yapıda, kolay ve bol bulunan sulu alümino – silikat bileşiklerine verilen isimdir (Altan ve ark., 1998). Yapısında büyük değişim olmaksızın katyon değişim özelliği, su kaybetme ve kazanma özelliği ile

karakterize edilir. Zeolit, doğal ya da sentetik (yapay) olmak üzere atomik düzeyde gözenekli bir yapıya sahiptir. Isıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen “Zeolit” adını almıştır. Yapıları bal peteği veya kafese benzeyen, değişebilir katyonlar ve su ihtiva eden, 2 – 12 Å boyutlarında milyonlarca kanal ve boşluklardan ibarettir. Katyonlar zayıf bağlı oldukları için zeolitler iyonlarını kolaylıkla değiştirebilirler. Gözeneklerdeki su molekülleri, ısıtıldığında zeolitik yapıyı kolaylıkla terk ederler veya tekrar emilebilirler. Zeolitin yapı birimi AlO_4 veya SiO_4 dörtlüsüdür (Enli Madencilik, 1993).

Sentetik zeolit, yapısında % 20 oranında su içeren ve PQ Corporation tarafından Amerika Birleşik Devletleri’ne üretilen bir katkıdır. Yapısındaki bu su, 98°C üzerindeki sıcaklıklarda açığa çıkarak bitümde köpüklenmeye neden olur. Bu miktardaki su (karışımın %0,05’i oranında), bitümün hacminde ufak çaplı bir artış yaratarak, karışımın işlenebilirliğini artırır. Bu durum sıcaklık 98°C’ın altına düşene kadar devam eder (Walker, 2009). Karışımın %0,25’i oranında bitüme eklenmesi tavsiye edilen katkı, yoğun, açık ve boşluklu gradasyona sahip karışım tasarımlarında, polimer modifiye bitümlerde ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanılabilir. Advera® WMA inorganik bir malzeme olduğundan bitümün penetrasyon sınıfını değiştirmez. Karışım ve sıkıştırma sıcaklıklarında sağladığı düşüşle çevreye zararlı emisyon değerlerinde %60 azalmaya neden olurken, %30 oranında da enerjinin korunumunu sağlar (Corrigan, 2008).

Köpüklendirme yöntemleri içerisinde yer alan ve sentetik zeolit İKA katkısı için kullanılan içerikler % 3 ile % 7 oranında değişmektedir.

Ülkemiz, zeolitlerin oluşması bakımından gerekli jeolojik ortamlara sahip olmasına rağmen, ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında bulunmuştur. Daha sonra Ankara’nın batısında klinoptilolit ve analsim tipi zeolit yatakları bulunmuştur. Volcano tortul oluşumlarının gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türleri yoğunluktadır. Türkiye’ de ayrıntılı etüdü yapılmış tek zeolit yatağı Manisa–Gördes civarındaki sahadır. Bu nedenle İKA

üretiminde kullanılmak üzere seçilmiştir. Sahada 18 milyon ton görünür klinoptilolit zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise, Türkiye'nin en önemli zeolit yataklanmaları tespit edilmiş olup kolaylıkla işletilebileceği anlaşılmıştır (Ayan, 2002). Türkiye genelinde yaklaşık 50 milyar ton civarında doğal zeolit bulunduğu ve bunların önemli bir miktarının batı bölgelerimizde yer aldığı tahmin edilmektedir.

Zeolitler için iskelet yapıları ve ikincil yapı üniteleri kombinasyonu temel alınarak bir sınıflandırma yapılmıştır (Breck, 1974). Sınıflandırma bakımından; klinoptilolit, analsim, sabazit, krimonit hōlandit, lōmontit, mordenit, natrolit ve filipsit yaygın bulunan minerallerdir (Köksaldı, 1999). Son 200 yılda 50 tip doğal zeolit ve 200'den fazla sentetik zeolit tanımlanmıştır.

Doğal zeolitlerin kullanımında; mineral çeşidi, kimyasal yapısı (Tablo 6.4), iç yüzey alanı, boşluk hacmi ve boyutu, tane boyutu ve bunlara bağlı olarak katyon değişimi ve emme kapasiteleri önemli özelliklerdir (Ayan, 2002).

Tablo 6.4 Zeolitin kimyasal yapısı (Altan, 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

* : Görülmedi

Doğal Zeolitlerin özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Enli Madencilik web sitesi, Ocak 2010):

- Katyon değişim özellikleri çok iyidir. Bu yönleri ile tarımda toprak düzenleyici olarak, su, gaz, v.b. kirlilik arıtımında ağır metal iyonlarının giderilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.
- Zeolitler, gözenekleri bal peteğine benzeyen mikro gözenekli malzemelerdir. Bazı maddeler bu gözenekler içine girebilir, bazıları giremez. Bu özellik zeolitlerin

seçimli emme, moleküler elek ve katalitik kullanım alanları gibi uygulamalarda değerlendirilmesini sağlar.

- Su emme kapasiteleri yüksektir, bu yönleriyle tarım ve diğer uygulamalarda sudan yararlanma etkinliğini artırmaya yardım ederler.
- Bazı radyoaktif maddeleri emebilirler, bu özellikleri ile radyoaktif yalıtım veya diğer çevresel radyoaktif arıtım uygulamalarında kullanılırlar.
- Çok geniş bir yüzey alanına sahiptirler, kirlilik arıtım uygulamalarında bulaşan ve diğer maddelerin giderilmesinde başarılı bir şekilde kullanılırlar.
- Zeolitler, bazı mikotoksinleri bağlayabilme özelliğine sahiptirler ve bu yönleriyle yem ve gıdalarda toksin bağlayıcı olarak kullanılırlar.
- Aktive-modifiye olarak antibakteriyel, antimikrobiyal v.b. birçok alanda kullanılırlar.
- Nem ve koku adsorpsiyonu özellikleri ile zeolitler evsel ve diğer uygulama alanları için değerlendirilirler.
- Bazı kil minerallerinden farklı olarak suda çözünmezler, Uyguladıkları ortamda uzun süre kullanılabilirler.
- Su arıtımı gibi birçok uygulamada, kolaylıkla geri kazanılabilirler ve defalarca kullanılabilirler.
- Isıl dayanımları oldukça iyidir, böylelikle yüksek sıcaklık şartlarında kullanılabilirler.

Doğal zeolitler günümüzde inşaat sektöründe puzolan çimento ve beton üretiminde, perlit ve diğer volkanik camlar gibi, doğal zeolitler de genişlemeye uygun olduklarından sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımları daha yüksek olup hafif agrega

olarak, hafif, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıları nedeniyle zeolitik tıfler kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri ile yapı taşı olarak kullanılırlar.

Tez kapsamında önemli bir yer teşkil eden doğal zeolit katkısı, sentetik zeolitler için alternatif olabileceği düşüncesi ile benzer içeriklerde kullanılması uygun bulunmuştur.

6.2 Ilık Karışım Asfalt Katkıları ile Bitüm Örneklerinin Hazırlanması

Bu bölümde her bir IKA katkısı için Brookfield viskozite deney cihazı kullanılarak optimum karıştırma süresi ile sıcaklığının tespiti üzerinde durulacak; ayrıca bitümlü karışım hazırlamak için temel teşkil eden karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları yine her bir IKA katkı ve içeriği için belirlenecektir.

6.2.1 IKA Katkıları için Üretim Süresi ve Sıcaklık Değerlerinin Belirlenmesi

IKA katkıları içeren bitümlü bağlayıcı deneylerine geçmeden önce her bir cins katkı ve farklı içerikleri için üretim süresi ve sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bunun için önceki bölümlerde ayrıntıları ile açıklanan Brookfield viskozite deneyi uygulanmıştır. Burada her bir katkı cinsi için tek bir içerik kullanılarak üretim süresi ve sıcaklıklarının tespit edildiğinin belirtilmesinde yarar vardır.

Öncelikli olarak, üretim sıcaklıkları sabit tutulan IKA katkılı bitüm örnekleri farklı sürelerde karıştırılarak viskoziteleri belirlenmiştir. Bunu için üretim süreleri her bir IKA katkı için 5'er dk. arttırılmış ve viskozite değerleri sabit olana kadar bu işleme devam edilmiştir. Viskozite değerlerinde sabit bir noktaya ulaşamadığı IKA katkılı bitüm örneklerinde ise üretim sıcaklıkları 15°C daha arttırılarak yukarıda belirtilen işlemlere devam edilmiştir. Viskozite değerlerinin sabit kaldığı üretim süresi ve sıcaklığı, ilgili IKA katkısı için üretim süresi ve sıcaklığı olarak belirlenmiştir (Tablo 6.5).

Tablo 6.5 Her bir IKA katkısı için üretim süre ve sıcaklıkları

KATKILAR	VİSKOZİTE DEĞERLERİ (mPa.s)					
	Organik SASOBİT®	Kimyasal REDİSET® WMX			Sentetik Zeolit ADVERA® WMA	DOĞAL ZEOLİT
Üretim Süreleri (dk.)	120 °C	120 °C	135 °C	150 °C	120 °C	120 °C
5	675	662,5	303,0	125,0	1150,0	—
10	650	712,5	325,0	137,5	1175,0	1150
15	650	725,0	337,5	187,5	1125,0	1063
20	650	737,5	312,5	187,5	1112,5	1038
30	650	762,5	—	200,0	1100,0	1038
45	650	737,5	—	187,5	1100,0	—
60	650	862,5	—	187,5	1100,0	—

Tablo 6.5'ten görüleceği gibi organik (Sasobit®), kimyasal (Rediset® WMX), sentetik zeolit (Advera® WMA) ve doğal zeolitlerin üretim süre ve sıcaklıkları sırası ile 10 dk – 120°C; 15 dk – 150°C; 20 dk – 120°C ve 20 dk – 120°C'dır.

Burada belirtilmesi gereken önemli bir husus vardır. Viskozite deneyi sonuçları yukarıda adı geçen IKA katkı ve içeriklerinin bitüme doğrudan eklenmesi sureti ile tespit edilmiştir. Ancak sentetik ve doğal zeolit gibi IKA katkı uygulamaları zeolitin filler yapısı nedeni ile viskozite deney sonuçlarını duyarlı hale getirdiği, dolayısı ile bu katkıların doğrudan karışıma da eklenebileceği söylenebilir.

ASTM standardında filler benzeri yapıya sahip olan katkıların bitüme ilave edilerek, viskozite değerlerinin tayini amacıyla aşağıdaki hususlar belirtilmiştir (ASTM D-4402-06.):

- Tek operatörlü duyarlılık (tekrarlanabilirlik) için standart sapma %21 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, aynı kişinin, aynı cihazı kullanarak, aynı sürede uyguladığı iki deneyde elde edilen sonuçlar arasındaki fark %59,4'ü aşıyorsa, bu sonuçların yüzde cinsinden ortalamaları alınmalıdır.
- Çok operatörlü hassasiyet (yenide üretilebilirlik) için standart sapma %33,2 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, farklı laboratuvarlarda, farklı operatörler ile aynı malzeme kullanılarak uygulanan deneylerde elde edilen sonuçlar arasındaki fark %94'ü aşıyorsa, bu sonuçların yüzde cinsinden ortalamaları alınmalıdır.

Bir kez daha belirtmek gerekirse, tez kapsamında kullanılan tüm katkılar bitüme doğrudan ilave edilerek tüm deneyler uygulanmıştır.

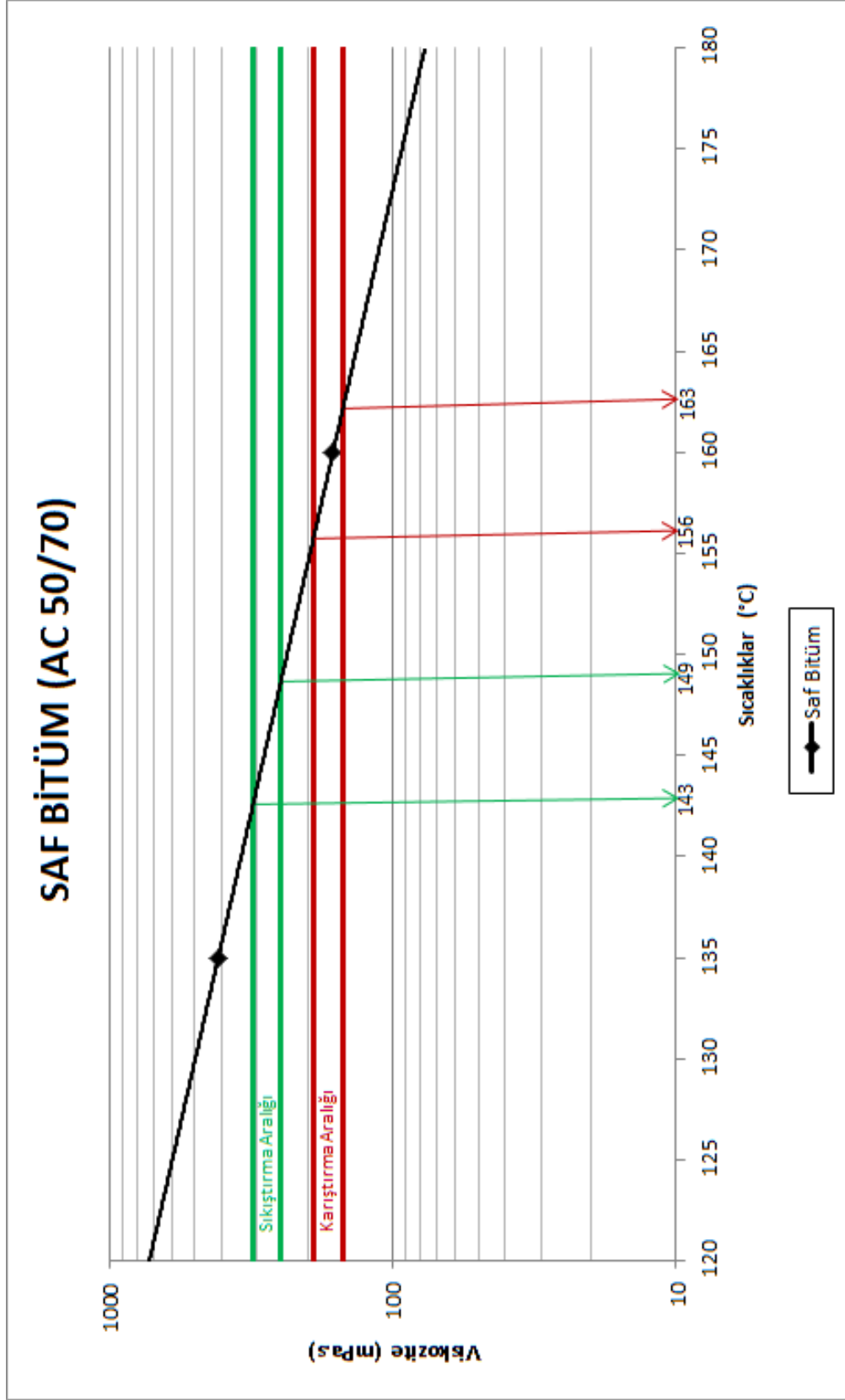
6.2.2 IKA Katkıları için Agregaya ile Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Bu bölümde farklı sıcaklık ve üretim sürelerinde bitüm örnekleri üzerinde 135°C ve 165°C sıcaklıklarda viskozite deneyleri uygulanmıştır. Burada amaç, bitüm – agregaya karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklar aralıklarının tespitidir.

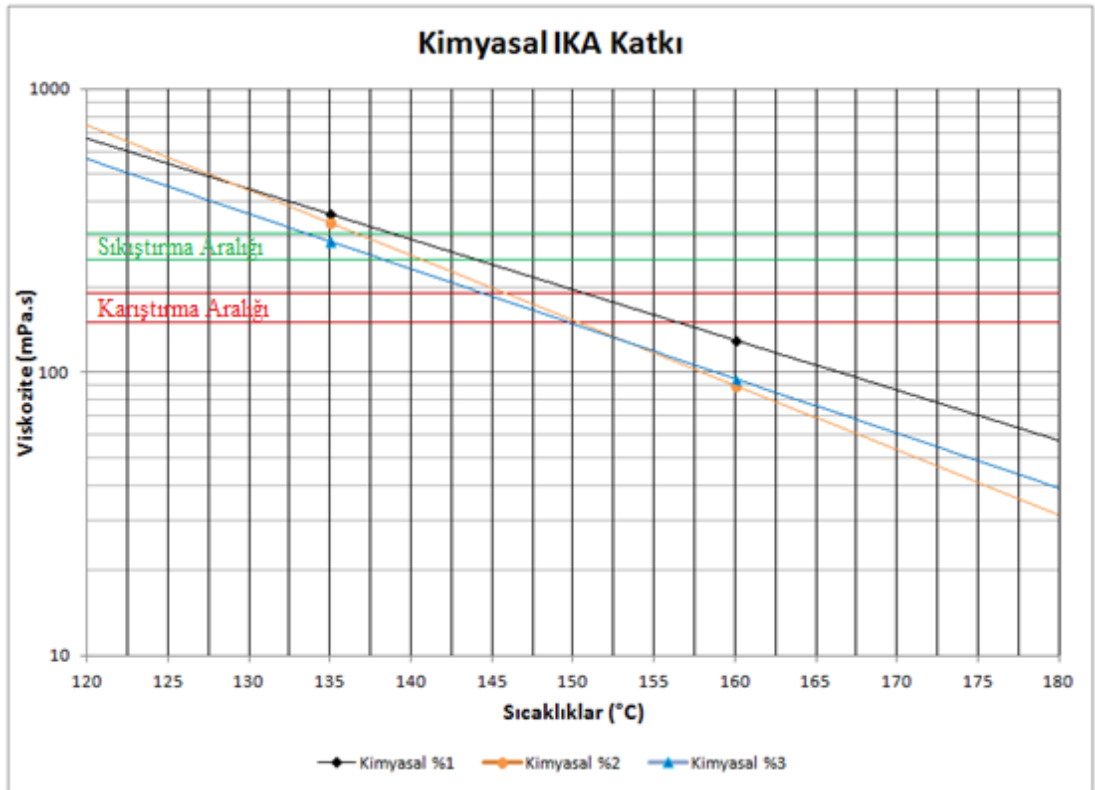
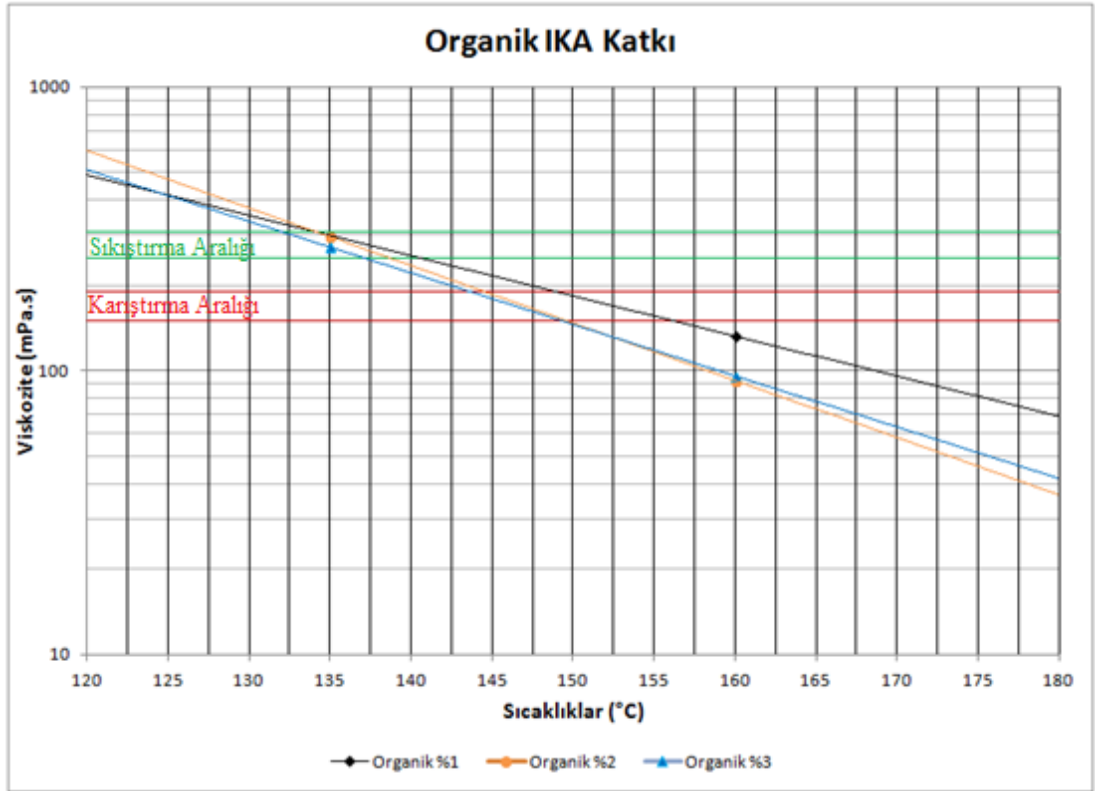
AASHTO T 312-01'e göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tayininde kullanılan viskozite değerleri sırasıyla 170±20 mPa.s ve 280±30 mPa.s'dir. Bu değerleri esas alarak saf bitüm ve IKA katkılara ait 135°C ve 165°C sıcaklıklar için çizilmiş grafikler Şekil 6.1-6.3'te sunulmaktadır. Saf bitüm ve her bir IKA katkıya ait belirlenen sıcaklıklar da Tablo 6.6'da özetlenmiştir.

Tablo 6.6 IKA katkılara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

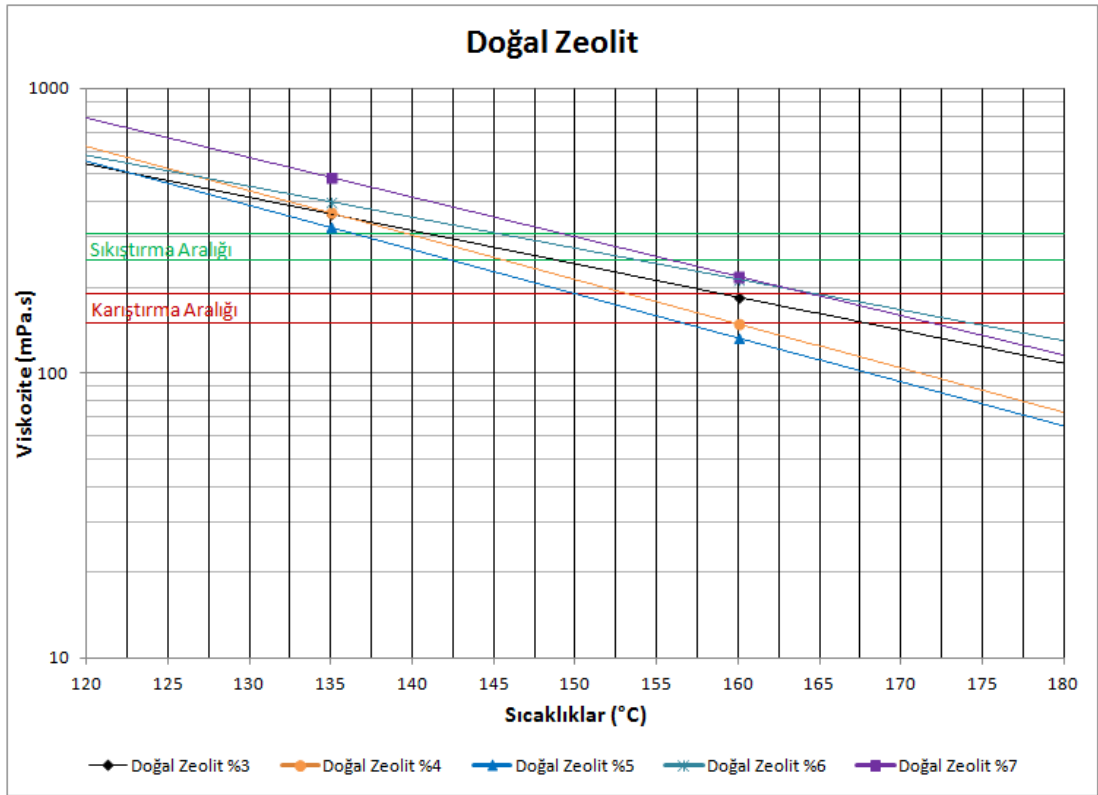
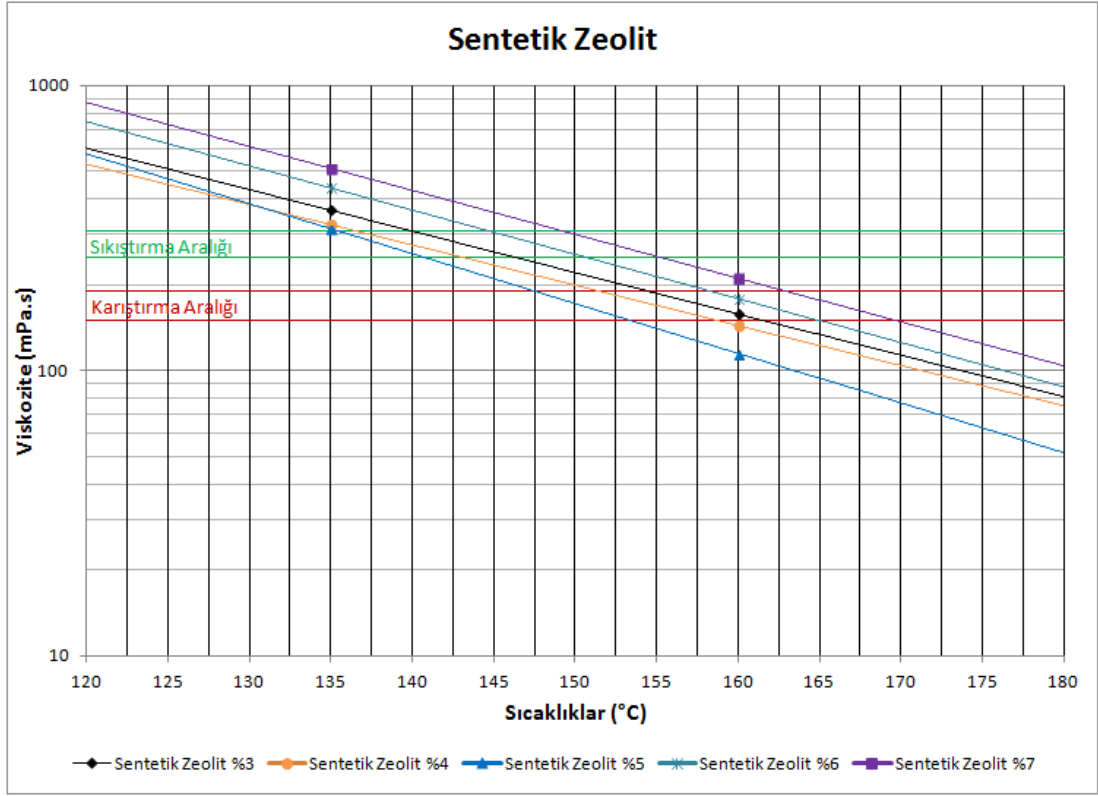
IKA Katkıları	Katkı İçeriği (%)	Karıştırma Sıc. (°C)	Sıkıştırma Sıc. (°C)
Saf Bitüm	0	156 – 163	143 – 149
Organik	2	149 – 156	134 – 139
	3	144 – 149	134 – 138
	4	144 – 149	132 – 137
Kimyasal	1	151 – 157	138 – 144
	2	148 – 153	136 – 140
	3	144 – 150	133 – 138
Sentetik Zeolit	3	155 – 162	139 – 146
	4	152 – 159	136 – 143
	5	147 – 152	135 – 142
	6	158 – 165	145 – 151
	7	163 – 169	149 – 155
Doğal Zeolit	3	158 – 168	141 – 149
	4	153 – 160	139 – 142
	5	150 – 157	137 – 142
	6	165 – 174	145 – 154
	7	164 – 172	149 – 156



Şekil 6.1 IKA katkılara ait kariştirma ve sıkıştırma sıcaklıkları grafiği



Şekil 6.2 Organik ve kimyasal İKA katkılara ait viskozite grafikleri



Şekil 6.3 Sentetik ve doğal zeolit İKA katkılara ait viskozite grafikleri

IKA katkıları ile hazırlanan bitüm örneklerine ait viskozite değerleri (Şekil 6.2 ve 6.3) incelendiğinde, sentetik ve doğal zeolit IKA katkı içeren bitüm örnekleri için %5 katkı içeriğine kadar IKA yüzdesi arttıkça viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu değerlerin üzerindeki içeriklerde (%6-7) ise viskozite değerleri artmıştır. Bu nedenle, viskozite değerleri dikkate alındığında, hem sentetik hem de doğal zeolit katkıları için %5 içerik değeri her iki tür zeolit katkı için de optimum içerik olarak değerlendirilebilir. Şekiller incelendiğinde, hem organik hem de kimyasal IKA katkıları ile hazırlanan bitüm örnekleri için, katkı içeriği arttıkça viskozite değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bu bağlamda, tüm organik ve kimyasal IKA katkıları işlenebilirliği arttırmakta ve görece olarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmektedir.

Tablo 6.2 incelendiğinde, bitüme organik, kimyasal, sentetik zeolit ve doğal zeolit ilavesi karıştırma sıcaklıklarını sırasıyla 13°C, 9°C, 6°C ve 9°C düşürürken; sıkıştırma sıcaklıklarını ise sırasıyla 10°C, 6°C, 6°C ve 7°C düşürmüştür.

6.3 Deney Sonuçları

Bu bölümde IKA katkı içeren bitüm örneklerine uygulanan geleneksel ve reolojik deney sonuçları verildikten sonra karışım deneyleri kapsamında ele alınan Marshall, İndirekt Çekme Gerilmesi ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç tayini deney sonuçları üzerinde durulacaktır.

6.3.1 Bitüm Deneyleri Sonuçları

6.3.1.1 Geleneksel Bitüm Deneyleri

Bu bölümde, IKA katkılarıyla hazırlanan bitüm örnekleri üzerinde bağlayıcının geleneksel özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla uygulanan; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, viskozite, yanma ve parlama noktası, ince film halinde ısıtma (TFOT), TFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile dönele

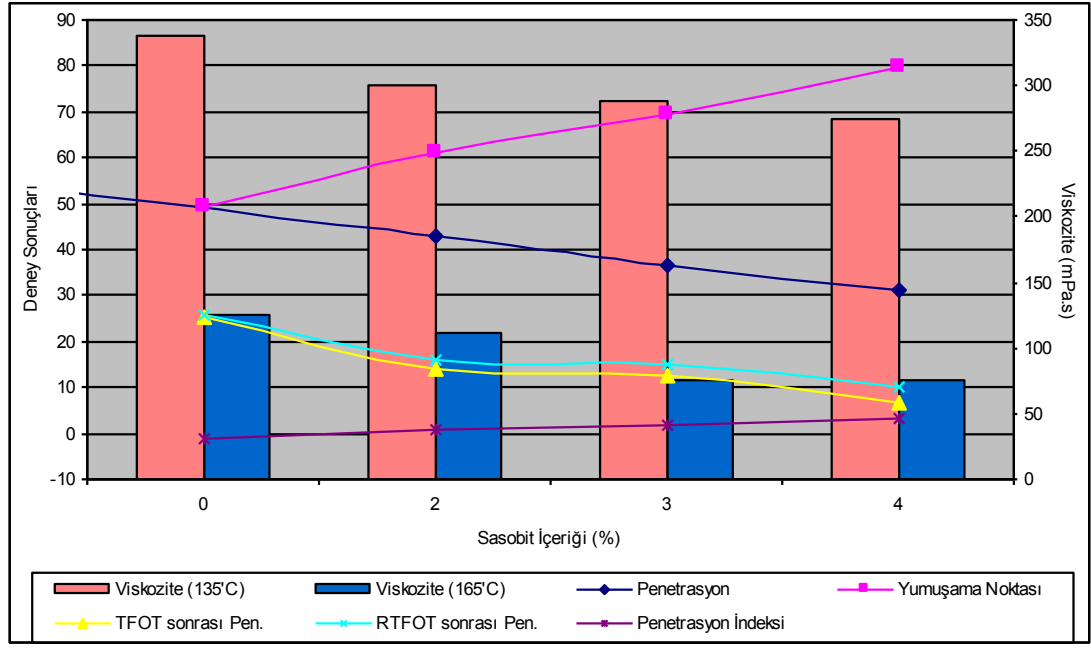
ince film halinde ısıtma (RTFOT), RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinin sonuçları tablolar halinde verilmektedir.

6.3.1.1.1 Organik IKA Katkılı Bitümler Üzerine Uygulanan Geleneksel Bitüm Deneyleri Sonuçları. Organik IKA katkısı ile üretilen bitüm örneklerinin geleneksel özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.7’de verilmektedir.

Tablo 6.7’den elde edilen sonuçlar kullanılarak, organik IKA katkı içeriğine bağlı bitüm örnekleri üzerinde uygulanan deney sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 6.4’te verilmiştir.

Tablo 6.7 Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerine uygulanan deneyler

Deney Adı	%0	%2	%3	%4
Penetrasyon (25°C; 0,1mm)	55	43	37	31
Yumuşama Noktası (°C)	49	61	69	80
Viskozite (135°C; mPa.s)	412,5	300	287,5	275
Viskozite (165°C; mPa.s)	137,5	112	75	75
Parlama Noktası (°C)	260+	260+	260+	260+
Düktilite (25°C, cm)	100+	100+	100+	100+
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C; 5sa.)				
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,07	0,07	0,08
Penetrasyon Farkı (%)	25	14	13	6
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,0	4,3	4,0	2,5
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi				
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,07	0,07	0,08
Penetrasyon Farkı (%)	26	16	15	10
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,3	4,5	4,3	3,5
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,20	0,89	1,95	3,07
Depolama Stabilitesi (°C)	-	1,8	1,6	1,6



Şekil 6.4 Organik IKA katkılı bitüm deneyleri sonuçları

Şekil 6.4 ve Tablo 6.7 incelendiğinde, organik ılık karışım asfalt katkısının ağırlıkça yüzdesi arttıkça penetrasyon değerlerinde azalma; buna karşın yumuşama noktası değerlerinde artma gözlenmektedir. Yumuşama noktasındaki artış bu katkı ile hazırlanan karışımların tekerlek izine karşı dirençli olabileceği anlamını taşımaktadır (Şengöz ve Işıkyakar, 2008). Sertlikteki artışa ek olarak, IKA katkısı ile hazırlanan bitümün penetrasyon indeksindeki artış, katkı içeriği arttıkça bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. IKA katkıların en önemli özelliği olan viskozite değerleri göz önüne alındığında, 160°C sıcaklık değerinde %3 organik IKA katkı ilavesinden sonraki değerlerde önemli bir değişim olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak, organik IKA katkısının soğumasıyla birlikte içerdiği mum yapısının kristalize lateral hale dönerek sertliği arttırmasıdır (Newcomb, 2007).

Bitümün silolarda bekletilmesi sırasında meydana gelen ve hava ile teması bağlı kısa dönem yaşlanmayı temsil eden ince film halinde ısıtma ve dönel ince film halinde ısıtma deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, organik IKA katkı içeriğinin artmasıyla bitümün yaşlanma etkilerine karşı dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir.

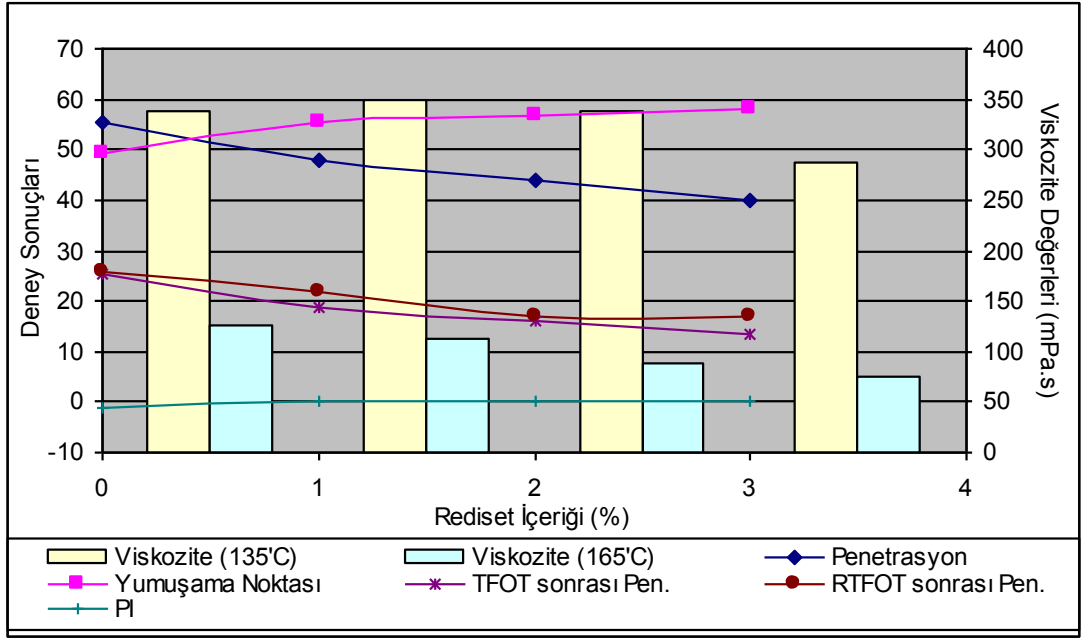
Tablo 6.7 incelendiğinde, organik IKA katkısı ile hazırlanmış bitüm örnekleri için depolama stabilitelerinin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, organik IKA katkısı içeren bitümün depolamaya oldukça elverişli olduğunu göstermekle birlikte, henüz IKA katkıları için belli bir şartname oluşturulmadığından çalışmaların şu anki durumunda kesin bir değerlendirme yapılmamaktadır.

6.3.1.1.2 Kimyasal IKA Katkılı Bitümler Üzerine Uygulanan Deneyler. Kimyasal IKA katkısı bitüm içine %1-3 oranlarında eklenmiş olup, üretilen bitüm örneklerinin geleneksel özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.8’de verilmektedir.

Tablo 6.8’den elde edilen sonuçlar kullanılarak, kimyasal IKA katkı içeriğine bağlı bitüm örnekleri üzerinde uygulanan deney sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6.8 Kimyasal IKA katkılı bitüm örnekleri üzerinde uygulanan deneyler

Deney Adı	%0	%1	%2	%3
Penetrasyon (25°C; 0,1mm)	55	48	44	40
Yumuşama Noktası (°C)	49	55	57	58
Viskozite (135°C; mPa.s)	412,5	350	337,5	287,5
Viskozite (165°C; mPa.s)	137,5	113	87,5	75
Parlama Noktası (°C)	260+	260+	260+	260+
Düktilite (25°C, cm)	100+	100+	100+	100+
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C; 5sa.)				
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,06	0,04	0,06
Penetrasyon Farkı (%)	25	19	16	13
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,0	3,4	2,5	1,5
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi				
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,06	0,07	0,08
Penetrasyon Farkı (%)	26	22	17	17
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,3	3,6	2,5	2,1
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,20	-0,04	0,04	0,09
Depolama Stabilitesi (°C)	-	2.2	0.5	0.6



Şekil 6.5 Kimyasal IKA katkıli bitüm deneyleri sonuçları

Tablo 6.8 ve Şekil 6.5 incelendiğinde, bitümlü bağlayıcı içerisindeki kimyasal IKA katkı oranının artmasıyla birlikte penetrasyon değerlerinin azaldığı, bununla birlikte yumuşama noktası değerlerinin arttığı görülmektedir. Buradan hareketle, kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitüm örnekleri soğuduğunda saf bitüm örneklerine göre daha sert bir hale gelmektedir. Katkı oranındaki artış ile azalan viskozite değerleri göz önüne alındığında, kimyasal IKA katkısı ile bitümlü karışımın işlenebilirliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Bitüm içerisindeki kimyasal IKA katkısı oranı arttıkça penetrasyon indeksi (PI) değerlerinin arttığı görülmektedir. Bitüm içerisindeki ağırlıkça kimyasal IKA katkısı oranı arttıkça bitümün yüksek sıcaklıktan kaynaklanan bozulmalara karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, kimyasal IKA katkısı içeren numunelerin penetrasyon indeksi değerleri organik IKA katkısı içeren değerler ile karşılaştırıldığında, organik IKA katkıların PI üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir.

Yukarıda belirtilenlere ek olarak, kısa dönem yaşlanma karakteristikleri incelendiğinde kimyasal IKA katkıların bitümün depo halinde bekletilmesi, agrega

ile karıştırılması, serilip sıkıştırılması sırasında oluşan yaşlanma etkilerini azalttığı görülmüştür.

Depolama stabilitesi sonuçlarına göre kimyasal IKA katkısı içeren (özellikle %2-3) numunelerin silolarda depolanabilme etkinliğinin arttığı belirlenmiştir.

6.3.1.1.3 Sentetik Zeolit Katkılı Bitümler Üzerine Uygulanan Deneyler. Sentetik zeolit katkısı bitüm ile %3-7 oranlarında eklenmiş olup, üretilen bitüm örneklerinin geleneksel özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.9'da verilmektedir.

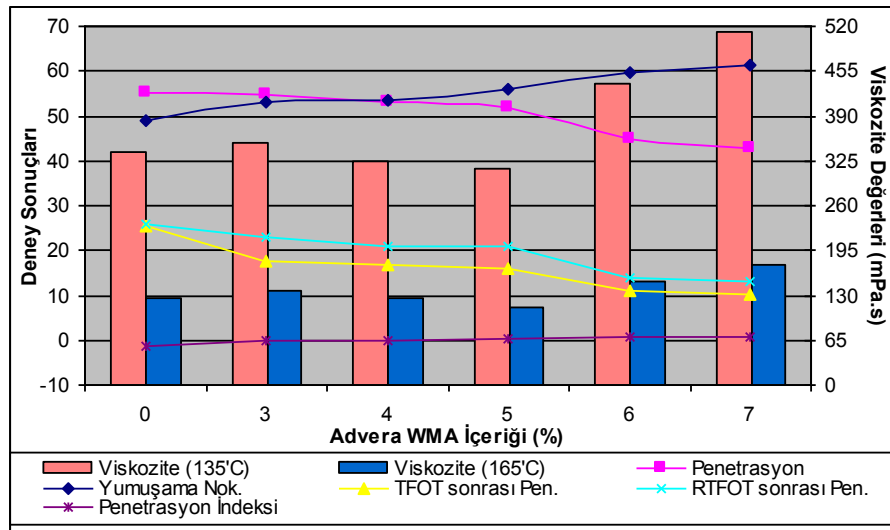
Tablo 6.9'dan elde edilen sonuçlar kullanılarak, sentetik zeolit içeriğine bağlı IKA katkılı bitüm örnekleri üzerinde uygulanan deney sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.9 Sentetik zeolit katkılı bitüm örnekleri üzerinde yapılan deneyler

Deney Adı	%0	%3	%4	%5	%6	%7
Penetrasyon (25°C; 0,1mm)	55	55	53	52	45	43
Yumuşama Noktası (°C)	49	53	54	56	60	61
Viskozite (135°C; mPa.s)	412,5	350	325	312,5	437,5	512,5
Viskozite (165°C; mPa.s)	137,5	138	125	112,5	150	175
Parlama Noktası (°C)	260+	260+	260+	260+	260+	260+
Düktilite (25°C, cm)	100+	100+	100+	100+	100+	100+
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C; 5sa.)						
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17
Penetrasyon Farkı (%)	25	18	17	16	11	10
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,0	4,9	4,7	4,1	3,3	3,2
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi						
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18
Penetrasyon Farkı (%)	26	23	21	21	14	13
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,3	5,0	4,8	4,5	3,7	3,2
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,20	-0,26	-0,22	0,27	0,74	0,87
Depolama Stabilitesi (°C)	-	1,4	1,6	1,6	2,2	2,4

Tablo 6.9 ve Şekil 6.6 incelendiğinde, bitüm örnekleri içerisindeki sentetik zeolit IKA katkısının ağırlıkça oranı arttığında penetrasyon değerleri düşmüş, buna bağlı

olarak yumuşama noktası değerleri artmıştır. Sentetik zeolit ile hazırlanan bitüm örnekleri soğutulduğunda, saf bitüm örneklerine göre sertliği daha fazla olmakta ve mukavemeti artmaktadır. Viskozite değerleri incelendiğinde, %3-5 arası sentetik zeolit katkısı ile hazırlanan bitüm örneklerinde viskozitenin azaldığı ancak %5'ten daha fazla olan değerlerde ise viskozitenin arttığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, sentetik zeolit içerisinde bulunan kılcal kanallardaki nemin köpüklenme sırasında tamamen buharlaştığı söylenebilir. Bitüme %5'ten fazla sentetik zeolit eklenmesi, bitüm içerisindeki sentetik zeolit oranını yükseltmekte, sentetik zeolitin mineral filler gibi davranmasına neden olabilmekte ve bitümün kıvamlılığını arttırabilmektedir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, sentetik ve doğal zeolit malzemelerin filler özellikleri göstermeleri nedeniyle viskozite deney sonuçlarında değişikliğe sebebiyet verdiğinin altını çizmek gerekir.



Şekil 6.6 Sentetik zeolit katkıli bitüm deneyleri sonuçları

Diğer IKA katkılarda olduğu gibi sentetik zeolit katkısının da yaşlanma özellikleri üzerinde olumlu etkileri vardır. Penetrasyon indeksi parametreleri bu katkının sıcaklıktan etkilenebilirliğinin azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, %5 sentetik zeolit içerinden daha fazla katkı yüzdeleri ile hazırlanan bitüm örneklerinin depolamaya uygun olmadığı gözlenmiştir.

Sentetik zeolit katkıli bitüm örnekleri üzerine uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, TFOT sonrası penetrasyon ve RTFOT sonrası penetrasyon deney

sonuçlarına göre bitümlü karışımlarda ağırlıkça %5 sentetik zeolit katkısı kullanımı optimum değer olarak alınabilir.

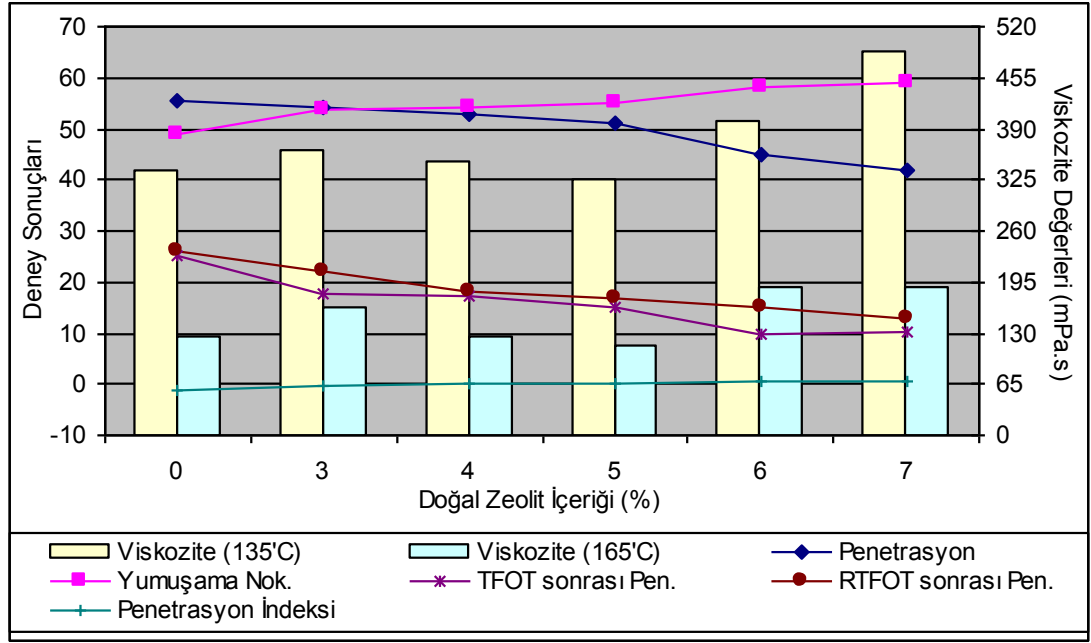
6.3.1.1.4 Doğal Zeolit Katkılı Bitümler Üzerine Uygulanan Deneyler. Doğal zeolit katkısı, sentetik zeolitle karşılaştırılabilmek amacıyla, bitüm ile %3-7 oranlarında eklenmiş olup, üretilen bitüm örneklerinin geleneksel özelliklerini ortaya çıkarmak için yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.10'da verilmektedir.

Tablo 6.10'dan elde edilen sonuçlar kullanılarak, doğal zeolit içeriğine bağlı İKA katkılı bitüm örnekleri üzerinde yapılan deney sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.10 Doğal zeolit katkılı bitüm örnekleri üzerinde yapılan deneyler

Deney Adı	%0	%3	%4	%5	%6	%7
Penetrasyon (25°C; 0,1mm)	55	54	53	51	45	42
Yumuşama Noktası (°C)	49	54	54	55	58	59
Viskozite (135°C; mPa.s)	412,5	362,5	350	325	400	487,5
Viskozite (165°C; mPa.s)	137,5	162,5	125,5	113	187,5	187,5
Parlama Noktası (°C)	260+	260+	260+	260+	260+	260+
Düktilite (25°C, cm)	100+	100+	100+	100+	100+	100+
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C; 5sa.)						
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17
Penetrasyon Farkı (%)	25	18	17	15	10	10
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,0	4,1	4,0	3,7	3,5	3,2
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi						
Kütle Değişimi (%)	0,04	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17
Penetrasyon Farkı (%)	26	22	18	17	15	13
Yumuşama Noktasındaki Artma (°C) Yumuşama Noktasındaki Azalma (°C)	5,3	4,4	4,3	3,7	3,2	3,0
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,20	-0,16	-0,10	0,02	0,40	0,44
Depolama Stabilesi (°C)	-	1,6	1,8	2,0	2,4	2,4

Tablo 6.10 ve Şekil 6.5 incelendiğinde, doğal zeolit ile hazırlanan bitüm örneklerinin geleneksel özellikleri, sentetik zeolit içeren örneklerin geleneksel özellikleri ile genel itibariyle uyumluluk göstermektedir. Bu durum, doğal zeolitin sentetik zeolite alternatif bir katkı olarak kullanılabileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 6.7 Doğal zeolit katkıli bitüm deneyleri sonuçları

6.3.1.2 Dinamik Kayma Reometresi Deneyi

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi, daha önce de belirtildiği üzere, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve normal sıcaklıklarda (servis sıcaklığı) yorulmaya karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 µm yüksekliktedir.

Bu bölümde öncelikle farklı IKA katkıları içeren hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitüm örnekleri üzerinde, şartnamede belirtilen frekans değerlerinde (10 rad/sn (1,59 devir/saniye)) ve farklı sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanarak $G^*/\sin\delta$ parametresi elde edilecektir. Böylelikle IKA katkılarının SUPERPAVE performans üst sınıfı belirlenecektir. Performans sınıfı (PG) üst sınırı $G^*/\sin\delta$ değerinin yaşlandırılmamış bitümler için 1000 Pa; RTFOT ile yaşlandırılmış bitümler için 2200 Pa değerine göre belirlenmiştir. PG alt sınır değerleri basınçlı

yaşlandırma kabı (PAV) ve kiriş eğme reometresi mevcut olmadığından belirlenememiştir.

Sınır değerler belirlendikten sonra aynı numuneler üzerinde sıcaklık ve frekans etkisini ortaya çıkarmak için G^* ve $G^*/\sin\delta$ elde edilerek değerlendirmelerde bulunulacaktır.

Her bir IKA katkı ve içeriği ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerinde farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR deneyi sonuçları Tablo 6.11-6.14'te özetlenmektedir.

Tablo 6.11 Organik IKA katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları

IKA Cinsi	IKA Adı	Katkı İçeriği (%)	Sıcaklık (°C)	DSR, $G^*/\sin\delta$ (Pa)		PG Üst Sınıfı
				Orijinal Bitüm	Yaşlandırılmış	
SAF BİTÜM	B 50/70	0	52	8802		64
			58	3620		
			64	1588	2878	
			70	779,4	1316	
			76			
			82			
ORGANİK KATKI	SASOBİT®	2	52	16110		70
			58	6729		
			64	2972	6470	
			70	1407	2959	
			76	709,8	1391	
			82		681,9	
		3	52	16100		70
			58	6674		
			64	2907	8669	
			70	1328	3890	
			76	642,2	1851	
			82		925,7	
		4	52	23670		76
			58	9982		
			64	4407	11850	
			70	2064	5032	
			76	1043	2385	
			82	550,9	1220	
			88		595,3	

Tablo 6.11 incelendiğinde, saf bitüme organik IKA katkısı eklenmesi ile birlikte aynı sıcaklık değeri için $G^*/\sin\delta$ değerleri artmaktadır. Bu durum, belirtilen katkı maddesi içeren karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı direnç gösterdiğinin bir ifadesidir. IKA katkı içeren numunelerin $G^*/\sin\delta$ değerleri kendi aralarında

değerlendirildiğinde %2 ve %3 organik IKA katkısı ile hazırlanan örneklerin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. IKA katkı içeriği ile PG üst sınıfı 64'ten 76'ya kadar çıktığı görülmüştür. Ancak, %3 organik IKA katkı içeriğinden sonra $G^*/\sin\delta$ parametresinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu artış özellikle yaşlandırılmış numunelerde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni, organik IKA katkısının yüksek içeriklerde lateral kristalize bir yapıya sahip olmasıdır (Edwards ve Redelius, 2003; Edwards ve ark., 2006).

Tablo 6.12 Kimyasal IKA katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları

IKA Cinsi	IKA Adı	Katkı İçeriği (%)	Sıcaklık (°C)	DSR, $G^*/\sin\delta$ (Pa)		PG Üst Sınıfı
				Orijinal Bitüm	Yaşlandırılmış	
SAF BİTÜM	B 50/70	0	52	8802		64
			58	3620		
			64	1588	2878	
			70	779,4	1316	
			76			
			82			
KİMYASAL KATKI	REDİSET® WMX	1	52	7773		64
			58	3187		
			64	1404	3276	
			70	665,2	1435	
			76			
			82			
		2	52	7559		64
			58	3160		
			64	1405	2946	
			70	679,3	1328	
			76			
			82			
		3	52	8433		64
			58	3574		
			64	1589	3311	
			70	759,6	1518	
			76			
			82			

Tablo 6.13 Sentetik zeolit katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları

İKA Cinsi	İKA Adı	Katkı İçeriği (%)	Sıcaklık (°C)	DSR, G*/sinδ (Pa)		PG Üst Sınıfı
				Orijinal Bitüm	Yaşlandırılmış	
SAF BİTÜM	B 50/70	0	52	8802		64
			58	3620		
			64	1588	2878	
			70	779,4	1316	
			76			
			82			
SENTETİK ZEOLİT	ADVERA® WMA	3	52	9826		64
			58	3993		
			64	1739	2820	
			70	819,1	1265	
			76			
			82			
		4	52	9147		64
			58	3883		
			64	1701	3005	
			70	805,4	1347	
			76			
			82			
		5	52	8774		64
			58	3581		
			64	1574	3356	
			70	734	1507	
			76			
			82			
		6	52	8461		64
			58	3460		
			64	1534	3115	
			70	721,9	1403	
			76			
			82			
7	52	9556		64		
	58	3924				
	64	1746	3629			
	70	820,1	1630			
	76					
	82					

Tablo 6.14 Doğal zeolit katkısı içeren numunelere ait DSR deneyi sonuçları

İKA Cinsi	İKA Adı	Katkı İçeriği (%)	Sıcaklık (°C)	DSR, G*/sinδ (Pa)		PG Üst Sınıfı
				Orijinal Bitüm	Yaşlandırılmış	
SAF BİTÜM	B 50/70	0	52	8802		64
			58	3620		
			64	1588	2878	
			70	779,4	1316	
			76			
			82			
DOĞAL ZEOLİT	DOĞAL ZEOLİT	3	52	8158		64
			58	3383		
			64	1495	3210	
			70	707,4	1459	
			76			
			82			
		4	52	6554		64
			58	2834		
			64	1278	2927	
			70	620,5	1314	
			76			
			82			
		5	52	7875		64
			58	3338		
			64	1469	2885	
			70	700,5	1308	
			76			
			82			
		6	52	10170		64
			58	4150		
			64	1806	2727	
			70	848,1	1215	
			76			
			82			
7	52	9436		64		
	58	3851				
	64	1710	3193			
	70	813,8	1440			
	76					
	82					

Tablo 6.12 incelendiğinde, saf bitüme kimyasal IKA katkısı eklenmesi ile tüm sıcaklık değerlerinde $G^*/\sin\delta$ değerleri düşmüştür. Ancak bu düşüşün düzeyde olmadığı görülmektedir. Kimyasal IKA katkı içeriği arttıkça (özellikle %1-2 içeriklerinde) $G^*/\sin\delta$ değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. %2'den sonra ise $G^*/\sin\delta$ değerlerinde artışlar olduğu belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, kimyasal IKA katkı içeriği arttıkça PG üst sınıfında herhangi bir değişim olmamaktadır.

Tablo 6.13'te görüldüğü gibi, saf bitüme sentetik IKA katkısı eklenmesiyle birlikte yaklaşık %5 içeriğe kadar $G^*/\sin\delta$ değerleri artmaktadır. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi, tekerlek izine karşı direncin arttığının bir ifadesidir. Sentetik zeolit ile hazırlanan bitüm örnekleri kendi içlerinde incelendiğinde, katkı içeriğindeki artış ile $G^*/\sin\delta$ değerleri düşmekte, %6 içerik ile hazırlanan örneklerden sonra ise artmaktadır. Bu durum, sentetik zeolit katkısının filler özelliği göstermesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, sentetik zeolit katkısının PG üst sınıfı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da saptanmıştır.

Tablo 6.14 incelendiğinde, sentetik zeolitin gösterdiği davranışın aksine, saf bitüme doğal zeolit eklendiğinde aynı sıcaklık derecesi için $G^*/\sin\delta$ değerleri %5 içeriğe kadar önemli artış göstermemekle birlikte, bu değerden sonra ise $G^*/\sin\delta$ değerleri artmıştır. Doğal zeolit katkısının PG üst sınıfı üzerinde sentetik zeolit gibi önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında IKA katkıları ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerinde sıcaklık ve yükün uygulama süresi incelenmiştir. Bu amaçla, hazırlanan numuneler düşük (0,01 Hz) ve yüksek frekanslar (10 Hz) ile altı farklı sıcaklıkta (30-80°C) DSR deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.8-6.15'te verilmektedir.

Şekil 6.8-6.15 incelendiğinde, tüm IKA katkılı örnekler için sıcaklığın azalmasıyla birlikte, G^* değerlerinin arttığı görülmektedir. G^* değerlerinde görülen bu artış, bitümlü malzemenin daha elastik bir davranış gösterdiğinin bir ifadesidir. Bununla birlikte, tüm bitüm örneklerinde frekans değeri arttıkça G^* değerlerinin de

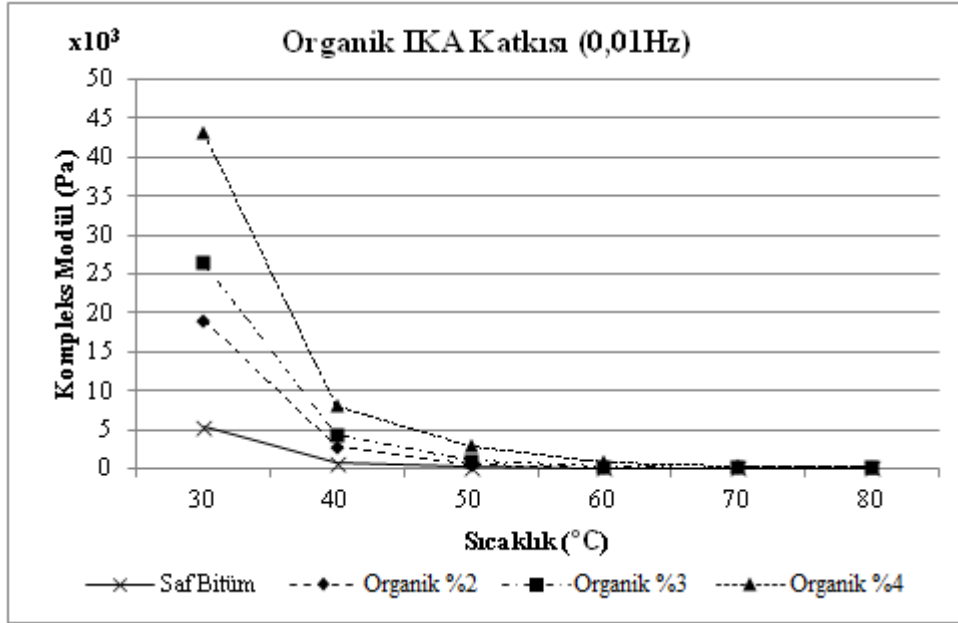
arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, kısa yükleme sürelerinde (yüksek frekans) bitümün reolojik özellikleri sebebiyle elastik davranış göstermesidir.

Şekil 6.8 ve 6.9 incelendiğinde, organik IKA katkısı ile hazırlanan bitüm örneklerine ait G^* değerleri tüm frekans ve sıcaklıklarda saf bitüm örneklerine göre daha yüksektir. Bununla birlikte, hem düşük hem de yüksek frekanslarda ve tüm sıcaklıklarda, organik IKA katkısı içeriğinin artmasıyla birlikte G^* değerleri de artmıştır. Bu artış, düşük sıcaklık ve frekans değerlerinde %3 katkı oranından daha yüksek içeriklerle hazırlanan numunelerde oldukça belirgindir.

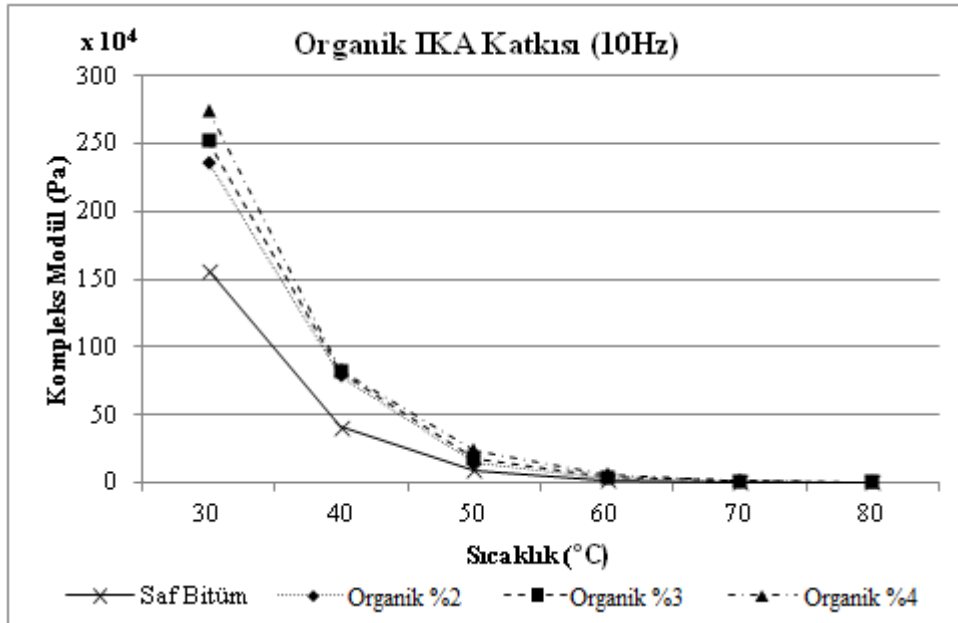
Şekil 6.10 ve 6.11’de gösterildiği gibi, tüm frekanslar için 30°C sıcaklıkta %2 kimyasal IKA katkısı içeren bitüm örneklerine ait G^* en yüksek değeri vermektedir. Beklendiği gibi, sıcaklık artışıyla birlikte G^* değerleri birbirine yaklaşma eğilimindedir.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te gösterildiği gibi, saf bitüm ile sentetik zeolit içeren bitüm örneklerine ait G^* değerleri karşılaştırıldığında bütün sıcaklıklar için önemli bir değişim görülmemektedir. Ancak, %5-6 sentetik zeolit ile hazırlanan bitüm örnekleri için yüksek frekans ve düşük sıcaklıkta G^* değerleri diğer oranlarda hazırlanan numunelere göre bir miktar artış sergilemiştir.

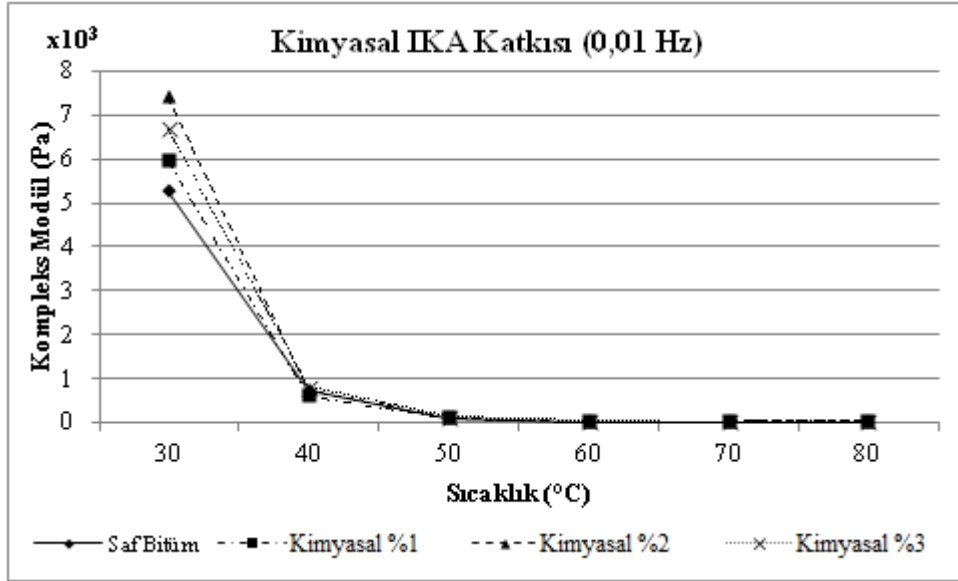
Şekil 6.14 ve 6.15’de görüldüğü gibi, düşük frekans için özellikle 30°C ve 40°C sıcaklıklarda doğal zeolit ile hazırlanan bitüm örnekleri arasında %5’ten daha yüksek katkı içeriğindeki numunelere ait G^* değerlerinde oldukça önemli bir değişiklik olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, bitüme belirtilen içerikten daha yüksek oranda doğal zeolit ilavesinin, bağlayıcı içerisinde filler etkisine yol açtığı söylenebilir. Yüksek frekanslarda ise bu değişim oldukça önemsiz bir orandadır.



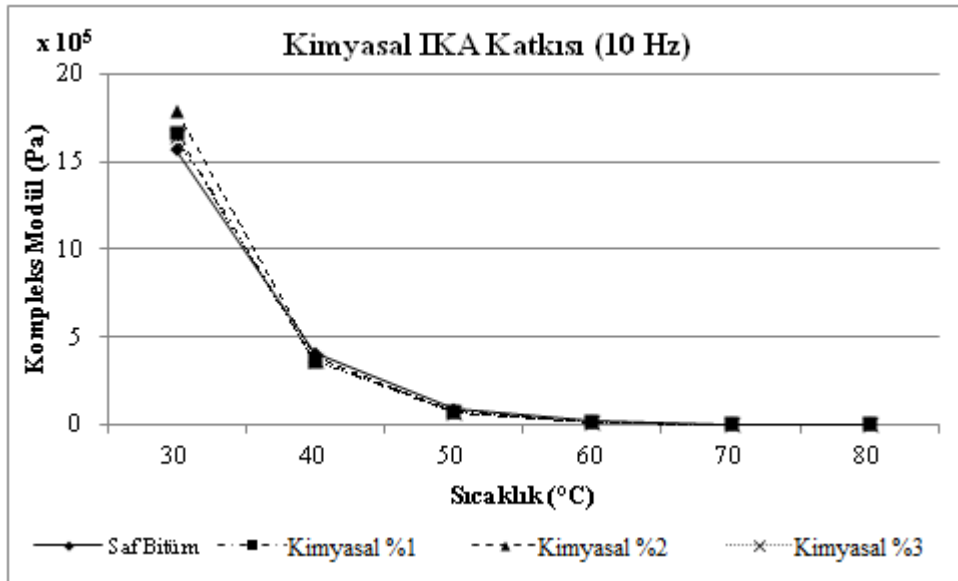
Şekil 6.8 Organik İKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)



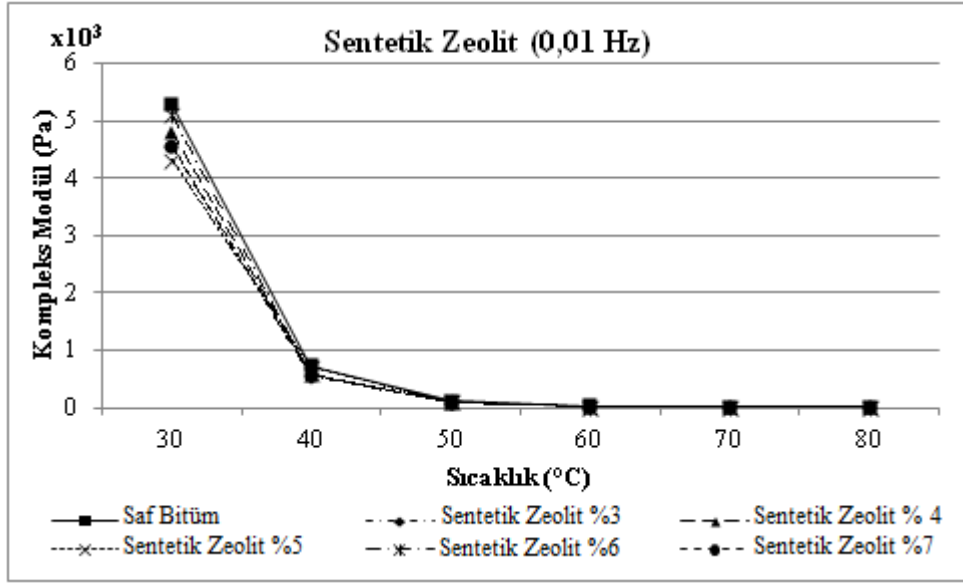
Şekil 6.9 Organik İKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz)



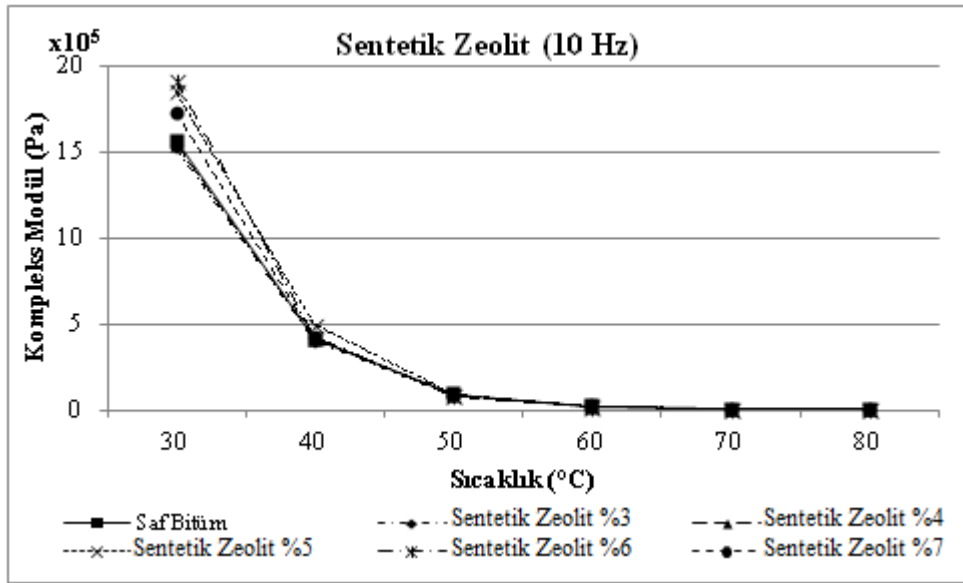
Şekil 6.10 Kimyasal IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)



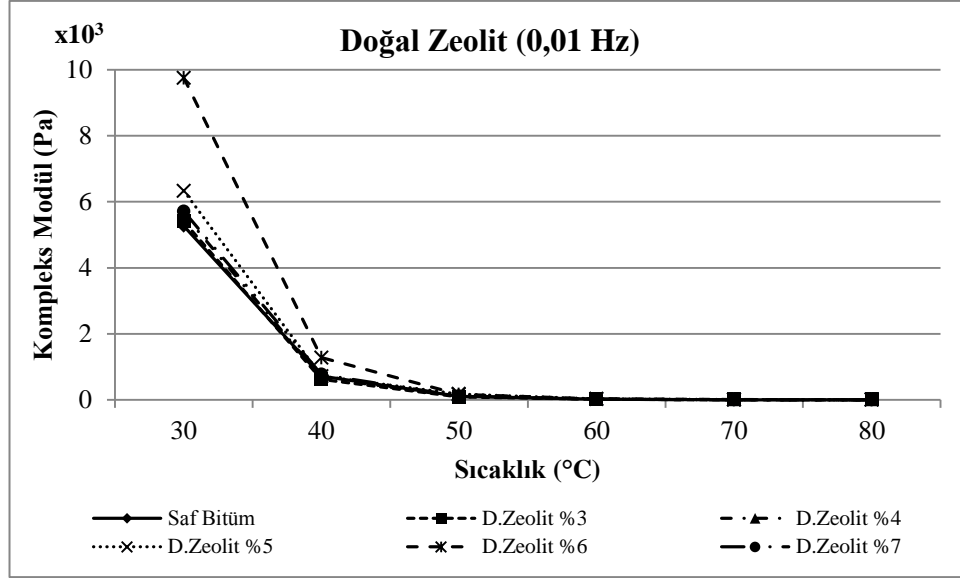
Şekil 6.11 Kimyasal IKA katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz)



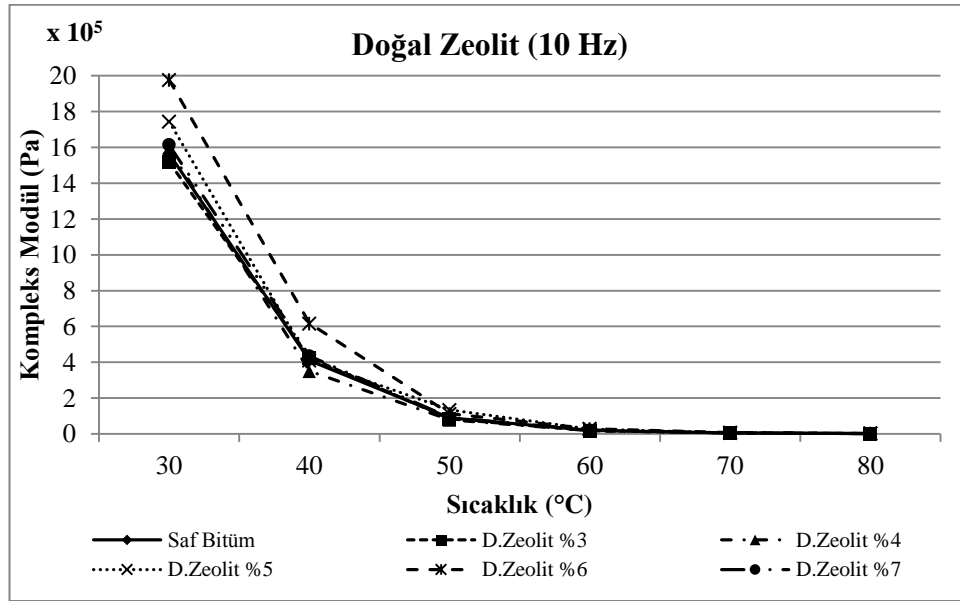
Şekil 6.12 Sentetik zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)



Şekil 6.13 Sentetik zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz)

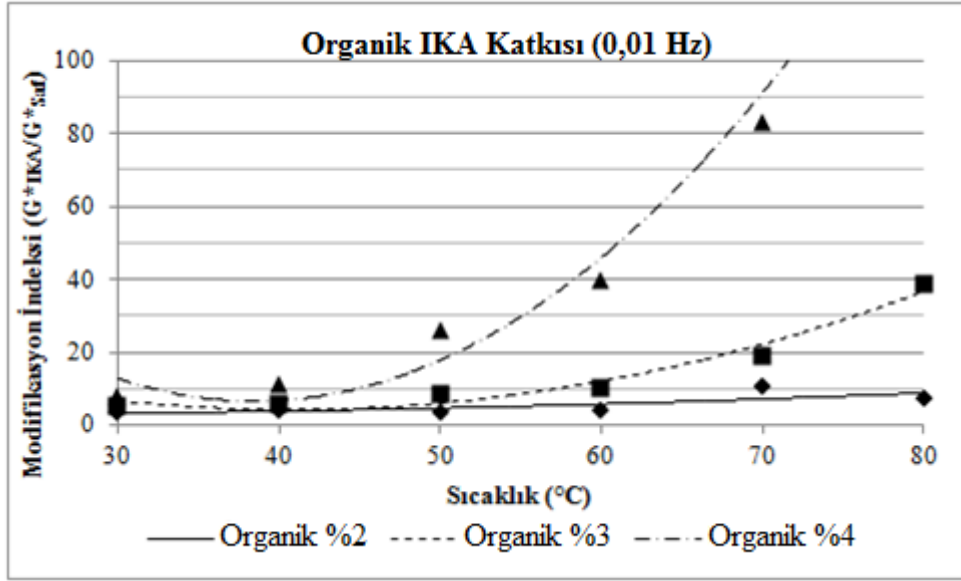


Şekil 6.14 Doğal Zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (0,01 Hz)

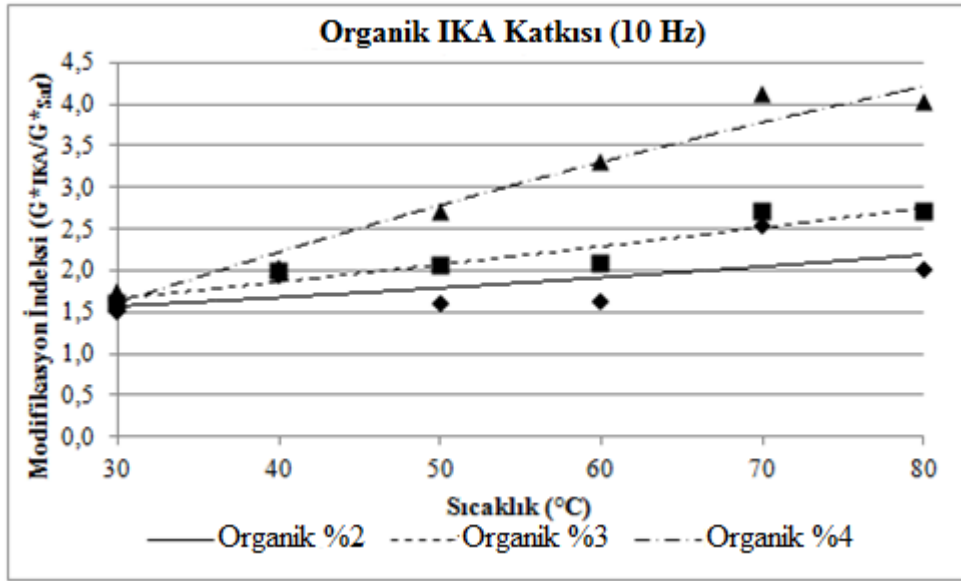


Şekil 6.15 Doğal Zeolit katkısına ait kompleks kayma modül değerleri (10 Hz)

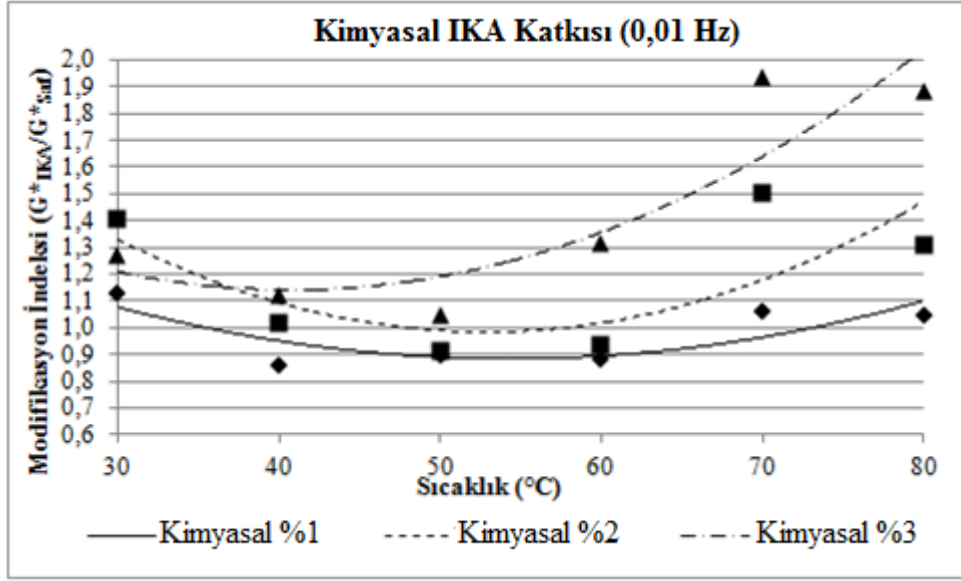
Tez kapsamında kompleks kayma modül (G^*) verilerinin daha sağlıklı değerlendirilebilmesi amacıyla, IKA katkılara ait G^* değerlerinin saf bitümden elde edilen G^* değerlerine oranı şeklinde ifade edilen modifikasyon indeksi (MI) belirlenmeye çalışılmıştır. Düşük ve yüksek frekanslar ile altı farklı sıcaklıkta belirlenen bu indeksler tüm IKA katkı içerikleri için çizilerek uygun polinom eğrileri olarak Şekil 6.16-6.23'te gösterilmektedir.



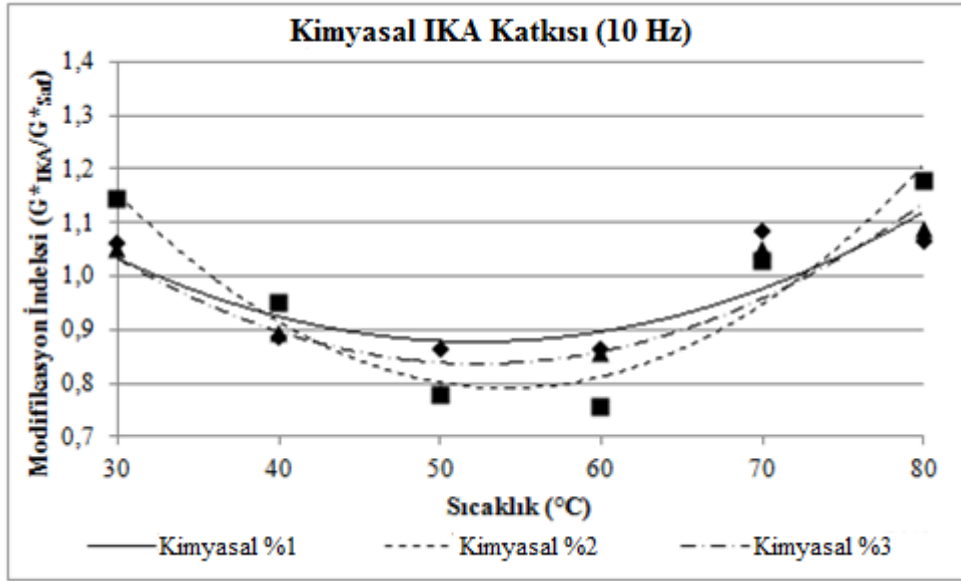
Şekil 6.16 Organik IKA katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)



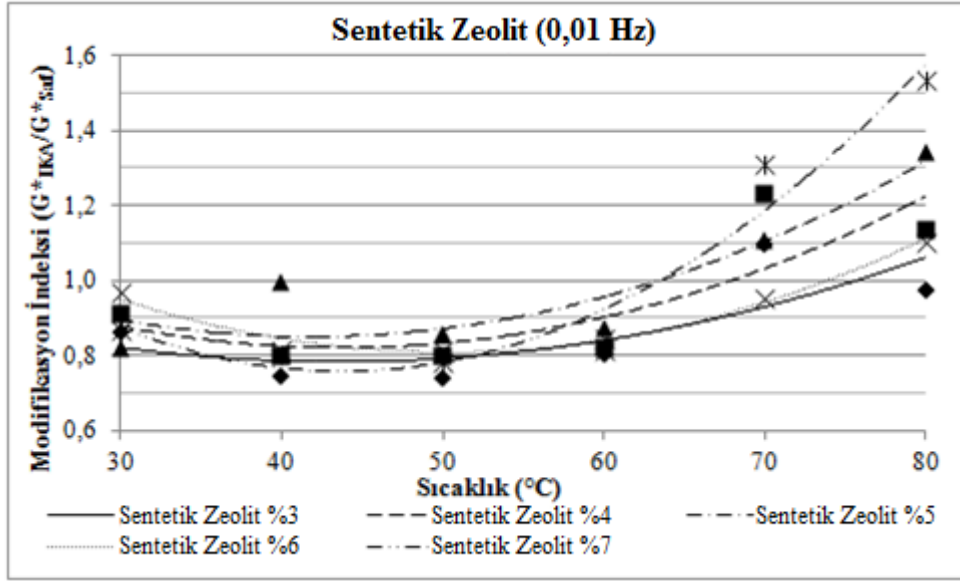
Şekil 6.17 Organik IKA katkısına ait MI değerleri (10 Hz)



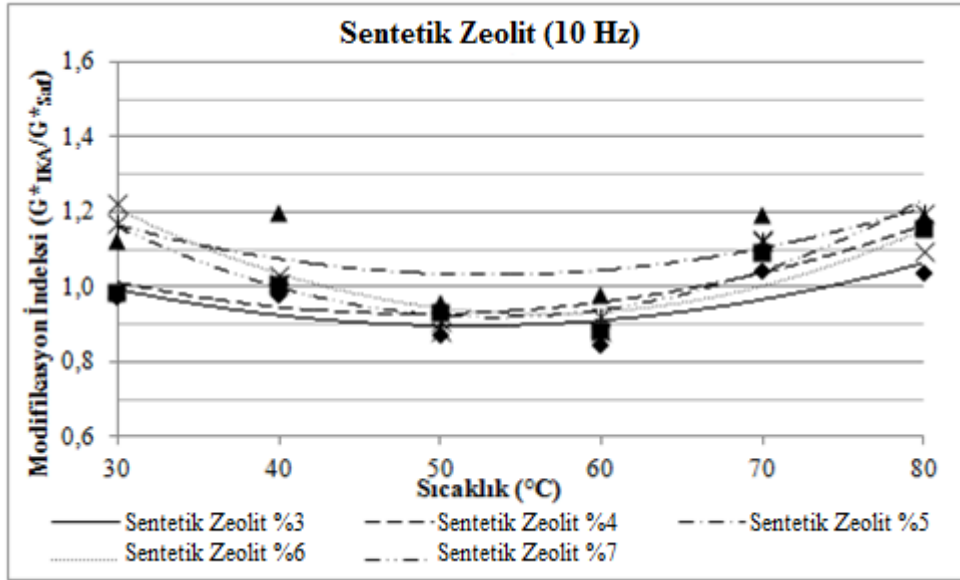
Şekil 6.18 Kimyasal IKA katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)



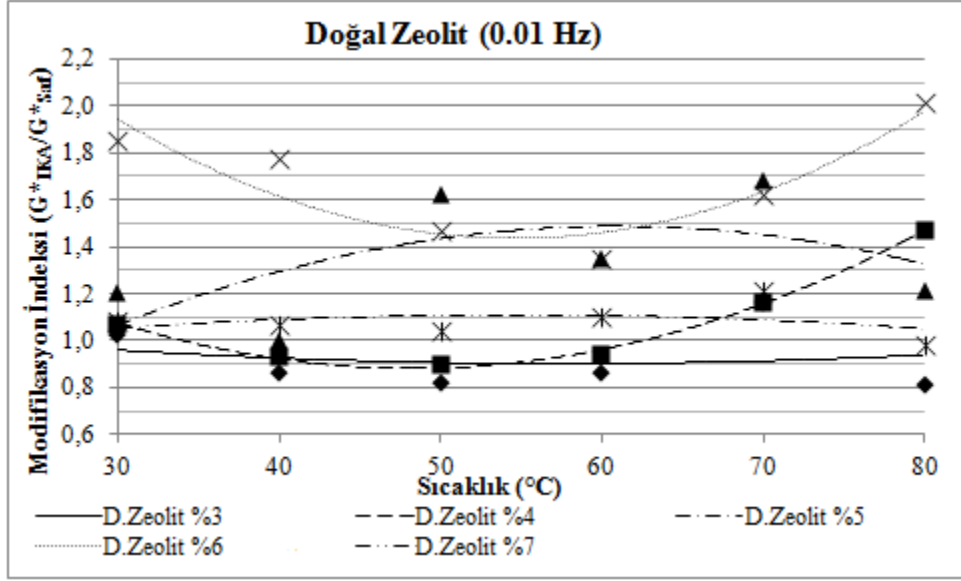
Şekil 6.19 Kimyasal IKA katkısına ait MI değerleri (10 Hz)



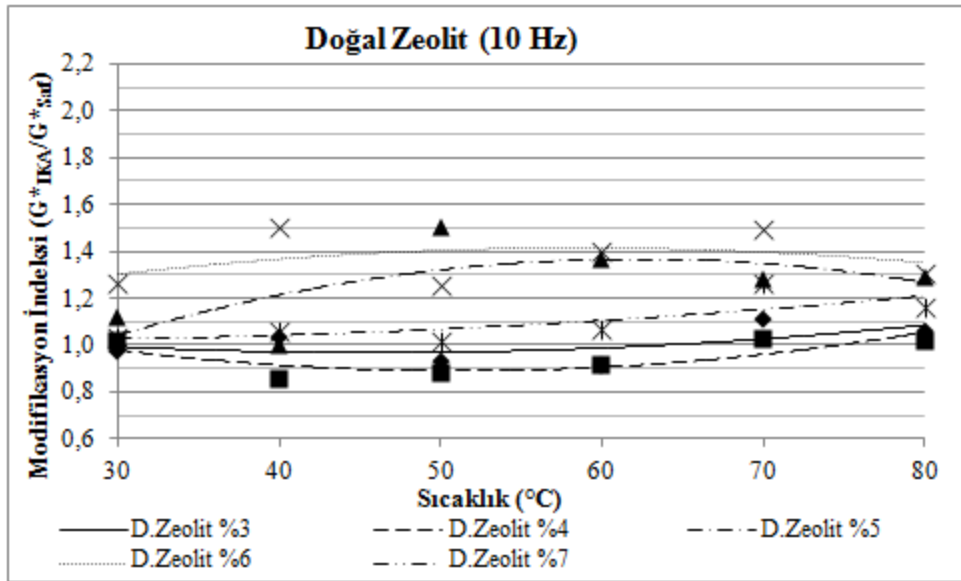
Şekil 6.20 Sentetik zeolit katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)



Şekil 6.21 Sentetik zeolit katkısına ait MI değerleri (10 Hz)



Şekil 6.22 Doğal zeolit katkısına ait MI değerleri (0,01 Hz)



Şekil 6.23 Doğal zeolit katkısına ait MI değerleri (10 Hz)

Şekil 6.16 ve 6.17’de görüldüğü gibi, tüm sıcaklık değeri için düşük ve yüksek frekanslarda bitüm içerisindeki organik IKA katkı oranı arttıkça MI değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Bu artış, %3 katkı içeriğinden yüksek oranlarda daha belirgindir. Buna ek olarak, hem düşük hem de yüksek frekanslarda sıcaklığın artmasıyla birlikte MI değerleri de artmıştır.

Kimyasal IKA katkısı ile ilgili olarak Şekil 6.18 incelendiğinde, tüm sıcaklıklar için düşük frekanslarda, katkı içeriği arttıkça MI değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, Şekil 6.19 göz önüne alındığında, yüksek frekanslar için benzer bir genelleme yapılamamaktadır.

Şekil 6.18 ve 6.19 birlikte değerlendirildiğinde, hem düşük hem de yüksek frekans değerlerinde 60°C'dan itibaren sıcaklığın artışıyla birlikte MI değerleri de arttığı söylenebilir. 40°C ile 60°C arasındaki sıcaklıklarda, MI değerleri en düşük seviyededir. Bununla birlikte, Şekil 6.11a'da görülebileceği üzere, tüm sıcaklıklar için düşük frekansta bitüme %3 kimyasal IKA katkı ilavesi en yüksek MI değerlerini vermiştir.

Şekil 6.20'de verildiği gibi, düşük frekans ve 60°C'ın altındaki sıcaklıklar için sentetik zeolit katkısı içeren bitüm örneklerine ait MI değerlerinde herhangi bir değişim görülmemektedir. Ancak, %5 sentetik zeolit ile hazırlanan bitüm örneklerinde 60°C'ın üzerindeki sıcaklıklar için sıcaklığın MI değerlerine etkisi çok daha belirgindir.

Şekil 6.21 göz önüne alındığında, %5 sentetik zeolit içeren bitüm örneklerine ait MI değerleri yüksek frekans ve tüm sıcaklıklarda diğer oranlarda hazırlanan örneklere göre bir miktar daha yüksektir.

Şekil 6.22 ve 6.23 incelendiğinde, tüm sıcaklıklar için düşük ve yüksek frekanslarda %6 doğal zeolit ile hazırlanan bitüm örneklerinin en yüksek MI değerini verdiği görülmektedir.

Şekil 6.23'de gösterildiği gibi, yüksek frekanslarda sıcaklığın artmasıyla birlikte MI değerlerinde önemli bir değişim tespit edilmemiştir. Ancak, benzer bir duruma düşük frekanslarda rastlanamamıştır (Şekil 6.22). Şekil 6.22 ve 6.23 incelendiğinde, sabit sıcaklık ve katkı içerikleri için frekansın artmasıyla doğal zeolite ait MI değerleri düşmüştür.

6.4 Ilık Karışım Asfalt Deney Sonuçları

Bu bölümde, tüm IKA katkı cins ve içerikleri ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde uygulanan deneylere ait sonuçlar verilecektir.

Öncelikli olarak, çalışmalarda kullanılan tüm IKA katkıları için ayrı ayrı optimum bitüm içerikleri tespit edilmiştir. Tez kapsamında her bir IKA katkısı farklı içeriklerde kullanılmasına rağmen, karışım tasarımında katkı içeriğinin optimum bitüm içeriği üzerinde etkisini belirlemek yerine, katkı içeriğinin optimum bitüm içeriğinde hazırlanan bitümlü karışımın diğer parametreler üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Marshall stabilite ve akma deneyi, indirekt çekme gerilmesi ve suya bağlı bozulma analizleri ayrıntıları ile ele alınmıştır.

6.4.1 Her Bir IKA Katkı için Optimum Bitüm Oranı Tayini

Tez kapsamında kullanılan her bir IKA katkısı için optimum bitüm içeriklerinin belirlenmesi amacıyla, her bir IKA katkı için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTS) belirtilen aşınma tabakası Tip-1 gradasyonu kullanılmıştır. Deneyde, 1150 gr. ağırlığındaki agrega karışımına (karışımın ağırlığına) sırası ile %3,5; 4,0; 4,5; 5,0 ve 5,5 oranlarında bitüm ilavesi yapılmıştır. Her bir bitüm yüzdesinde 3'er adet hazırlanan bitüm-agrega karışımları Marshall kalıplarına yerleştirilerek sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları viskozite deneyinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiş ve uygulanmıştır. Sıkıştırılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra kriko yardımıyla kalıplardan çıkartılarak 30-40 dk süresi ile 60°C sıcaklığındaki su banyosunda bekletilmiş ve daha sonra Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Her bir Marshall briketi için gerekli yoğunluk, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra,

- Pratik özgül ağırlık - % Bitüm
- Stabilite - % Bitüm
- Akma - % Bitüm
- Asfaltla dolu boşluk (VFA) - % Bitüm

- Hava boşluğu (V_h) - % Bitüm
 - Mineral agregalar arası boşluk (VMA) - % Bitüm
- grafikleri çizilmiştir.

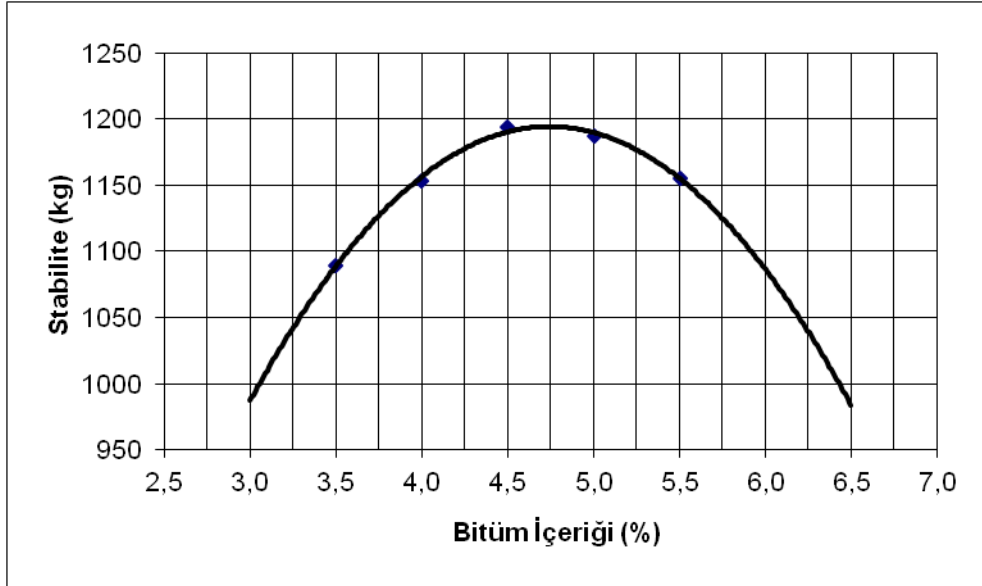
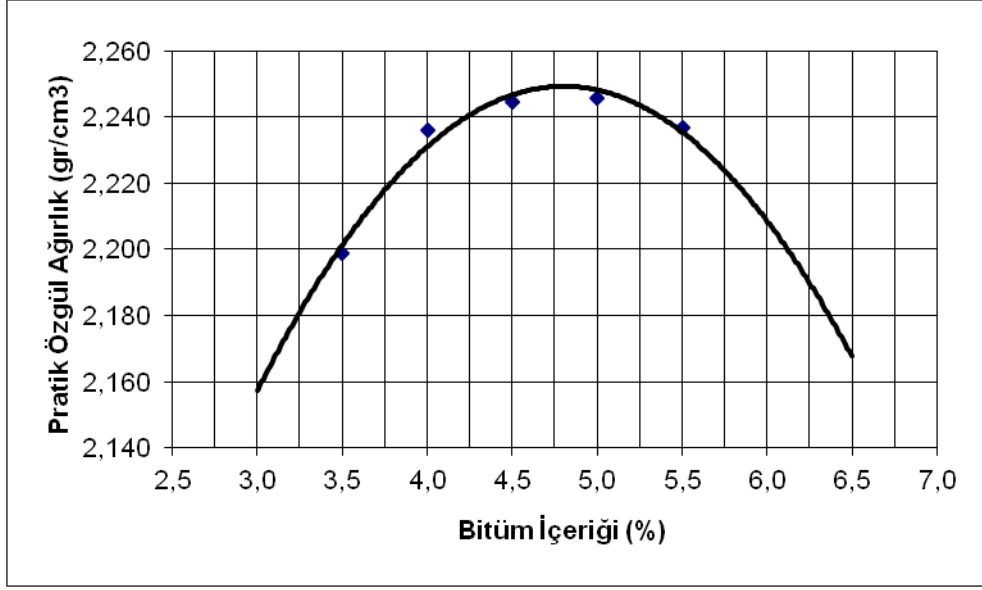
Tasarım bitüm içeriği bir diğer ifade ile optimum bitüm içeriği, KTŞ'nde aşınma tabakası için belirtilen hava boşluk içeriğinin alt ve üst sınır limitlerinin ortalaması olan ve %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm içeriği olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm içeriğinde KTŞ'nde aşınma tabakası için yukarıda sıralanan parametrelerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Aşağıda her bir IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışımlar için optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde elde edilen grafikler ayrıntıları ile açıklanmış ve her bir katkı için optimum bitüm içerikleri tablo olarak düzenlenmiştir.

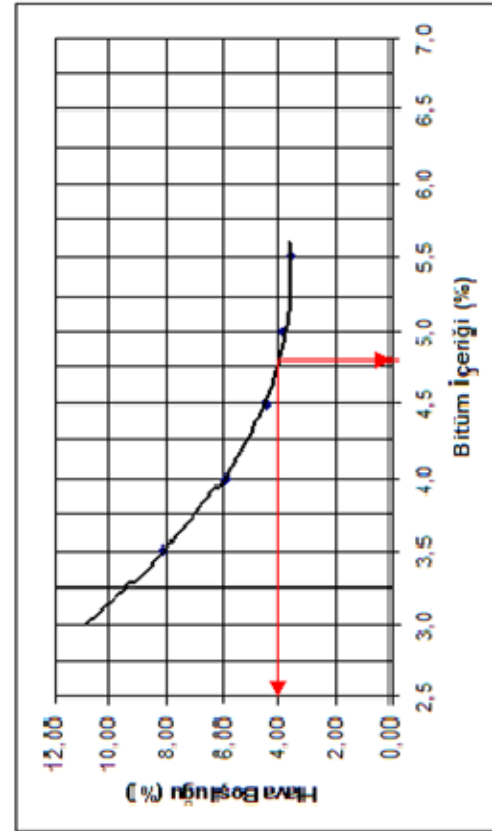
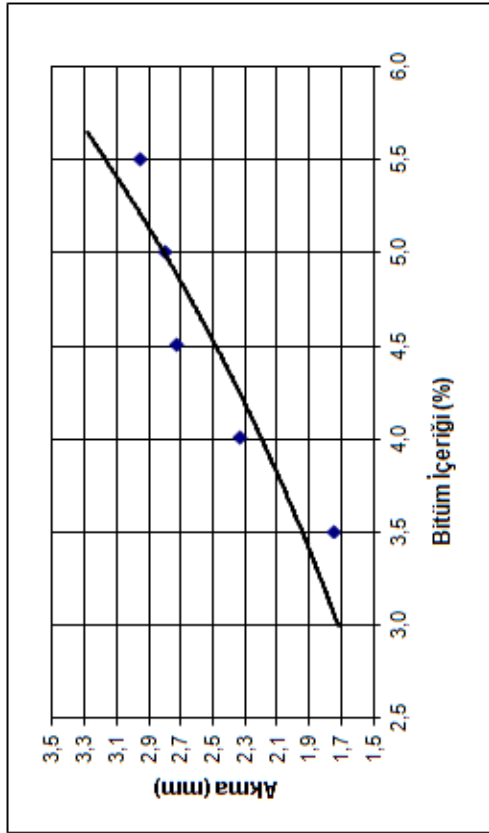
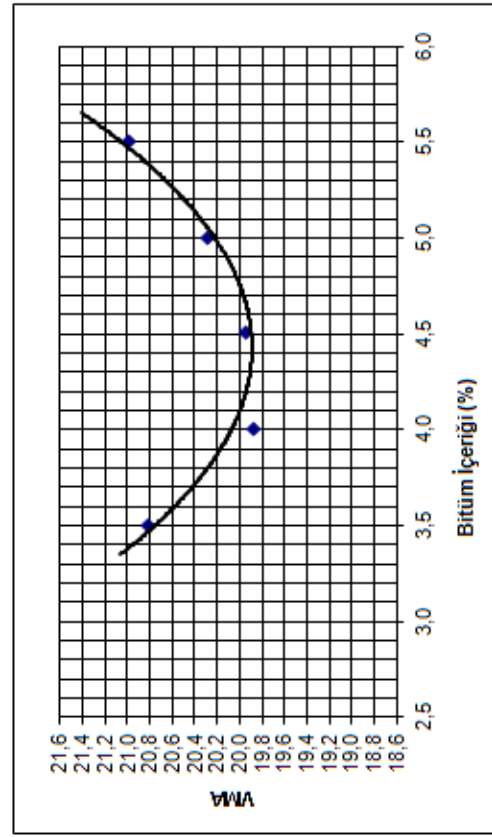
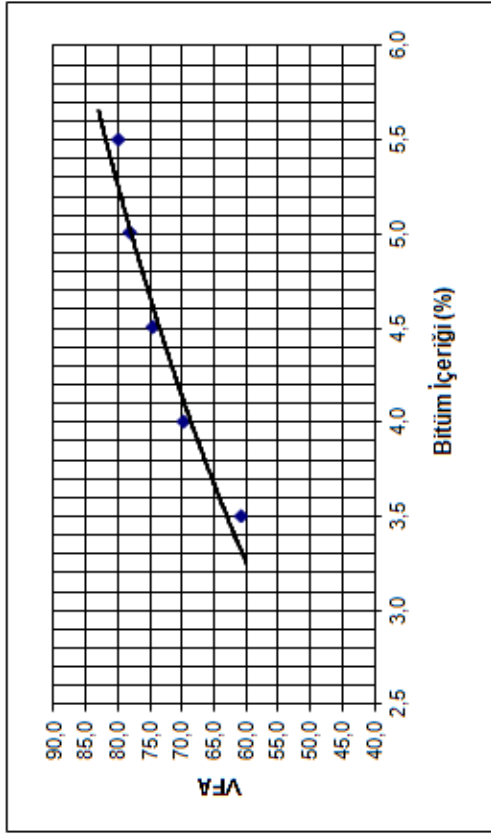
6.4.1.1 Saf Bitüm ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Optimum Bitüm İçeriği

Saf bitüm ile hazırlanan örnekler üzerinde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi amacıyla karışıma uygulanan Marshall Deneyi sonuçları Şekil 6.24'te verilmiştir.

Şekil 6.24 incelendiğinde, saf bitüm ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği % 4 hava boşluğuna karşılık gelen değer olan % 4,72 olarak bulunmuş ve tüm karışım deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 6.24 Saf bitüm ile hazırlanan örnekler için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları

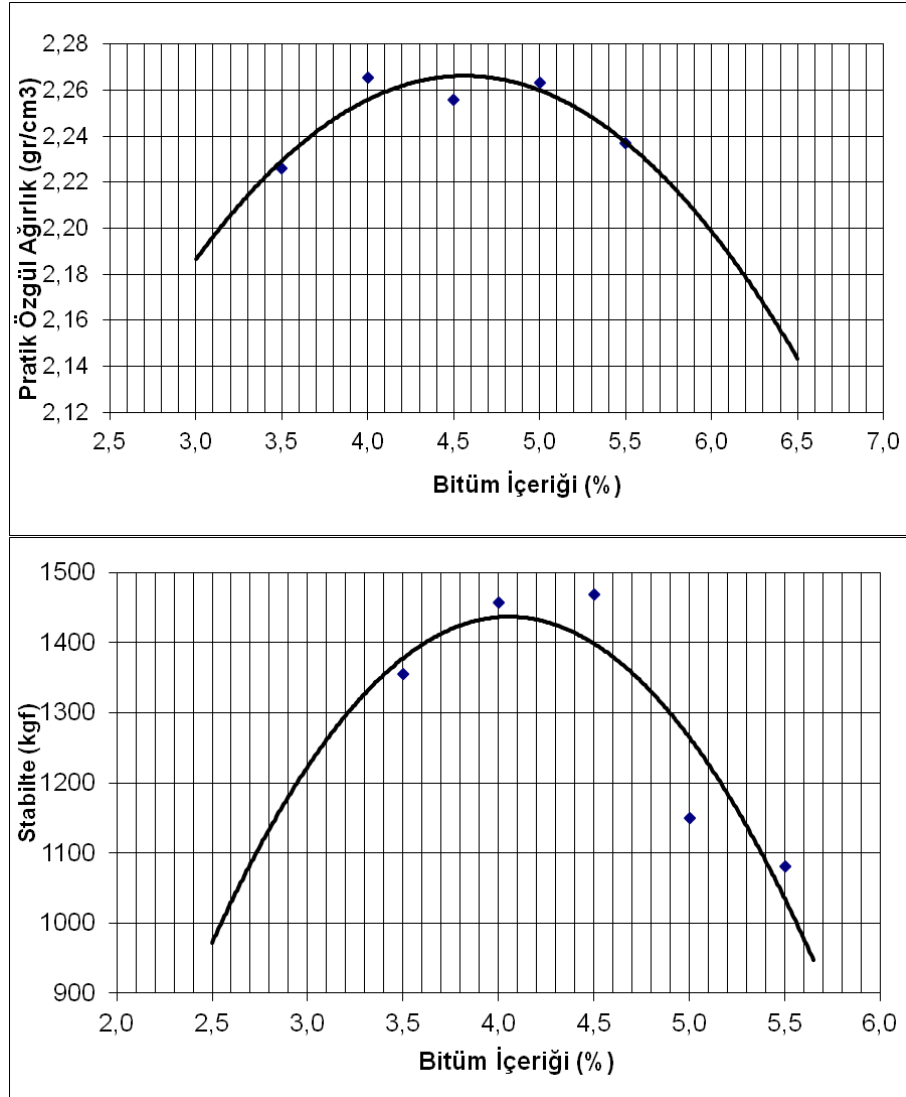


Şekil 6.24 Saf bitüm ile hazırlanan örnekler için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları (Devam)

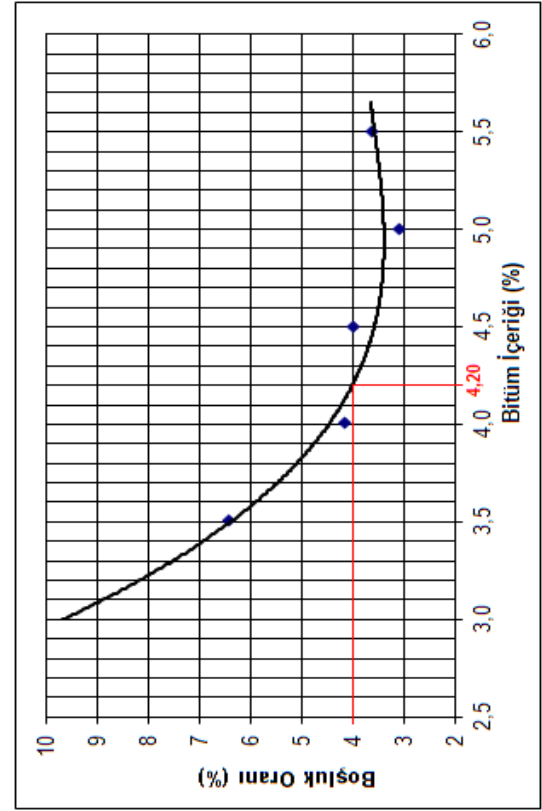
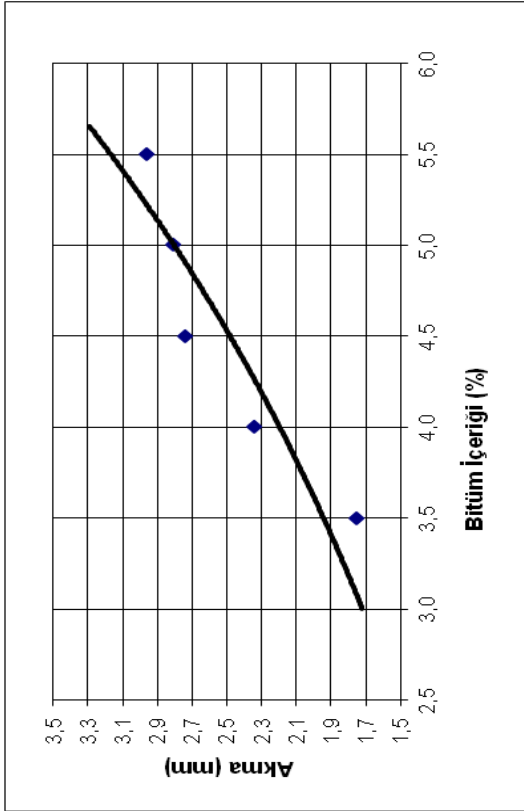
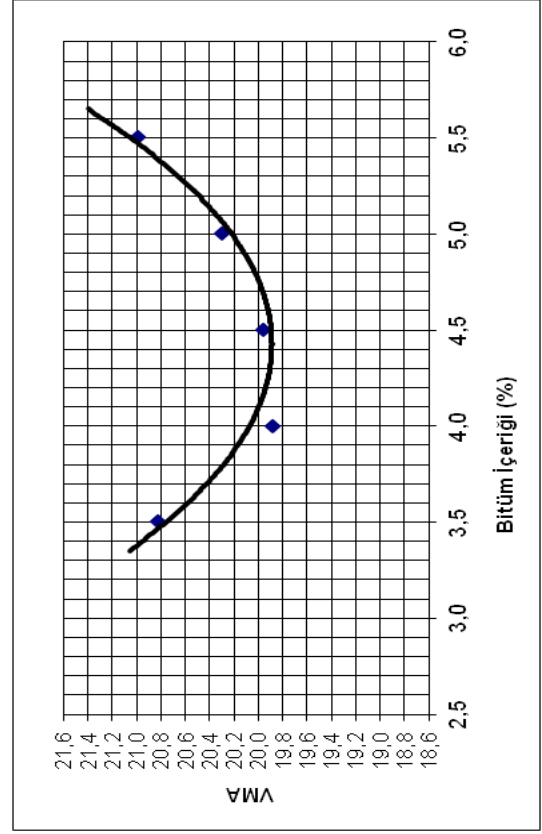
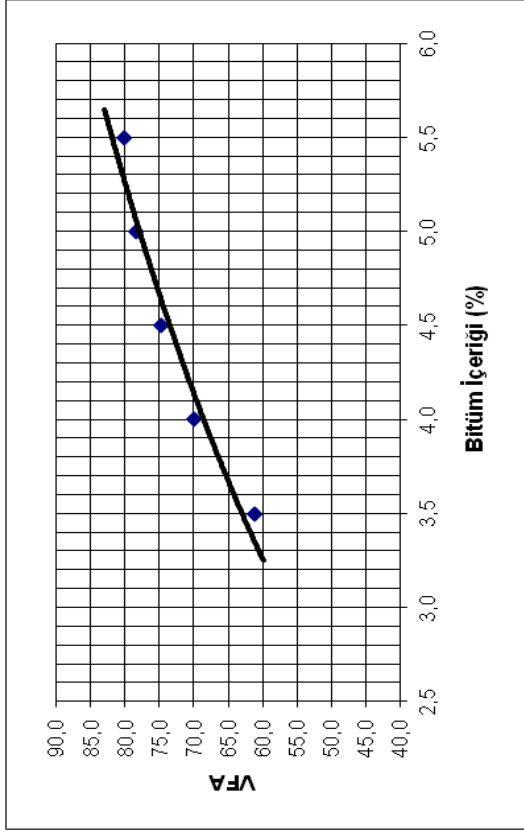
6.4.1.2 Organik IKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Optimum Bitüm İçeriği

Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi amacıyla, karışıma uygulanan Marshall Deneyi sonuçları Şekil 6.25'te verilmiştir.

Şekil 6.25 incelendiğinde, organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği % 4 hava boşluğuna karşılık gelen değer olan % 4,20 olarak bulunmuş ve organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 6.25 Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları

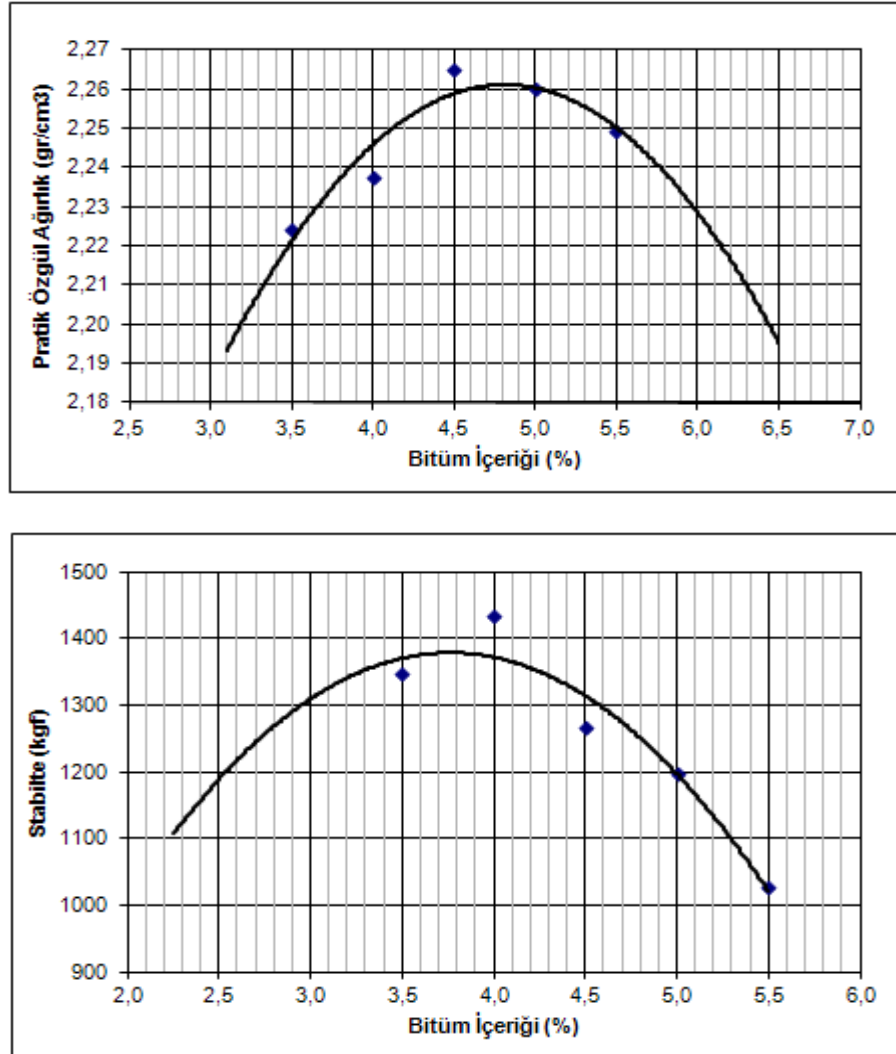


Şekil 6.25 Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları (devam)

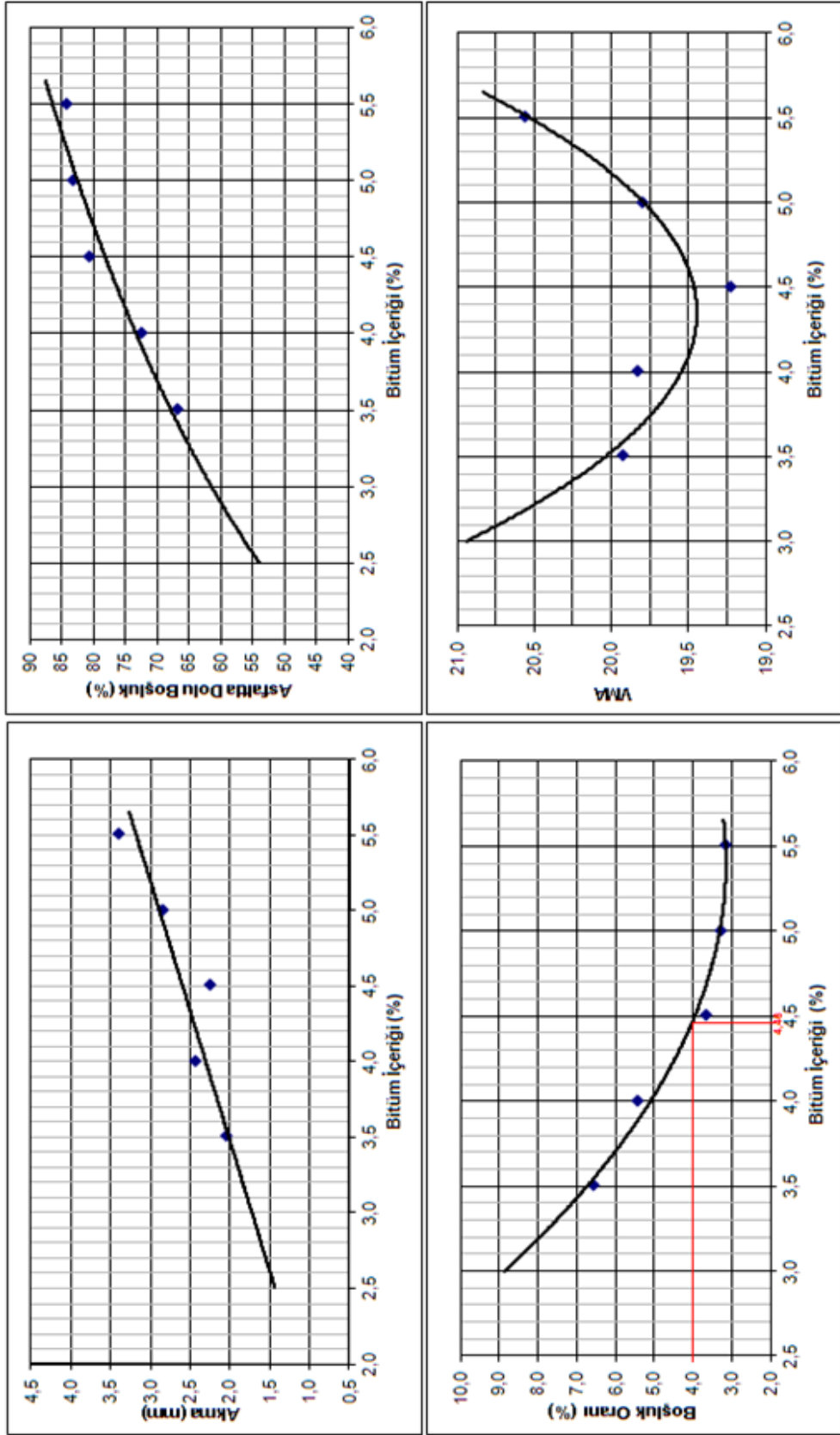
6.4.1.3 Kimyasal IKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Optimum Bitüm İçeriği

Kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi amacıyla, karışıma uygulanan Marshall Deneyi sonuçları Şekil 6.26'da verilmiştir.

Şekil 6.26 incelendiğinde, kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği % 4 hava boşluğuna karşılık gelen değer olan % 4,46 olarak bulunmuş ve kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 6.26 Kimyasal IKA katkı ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları

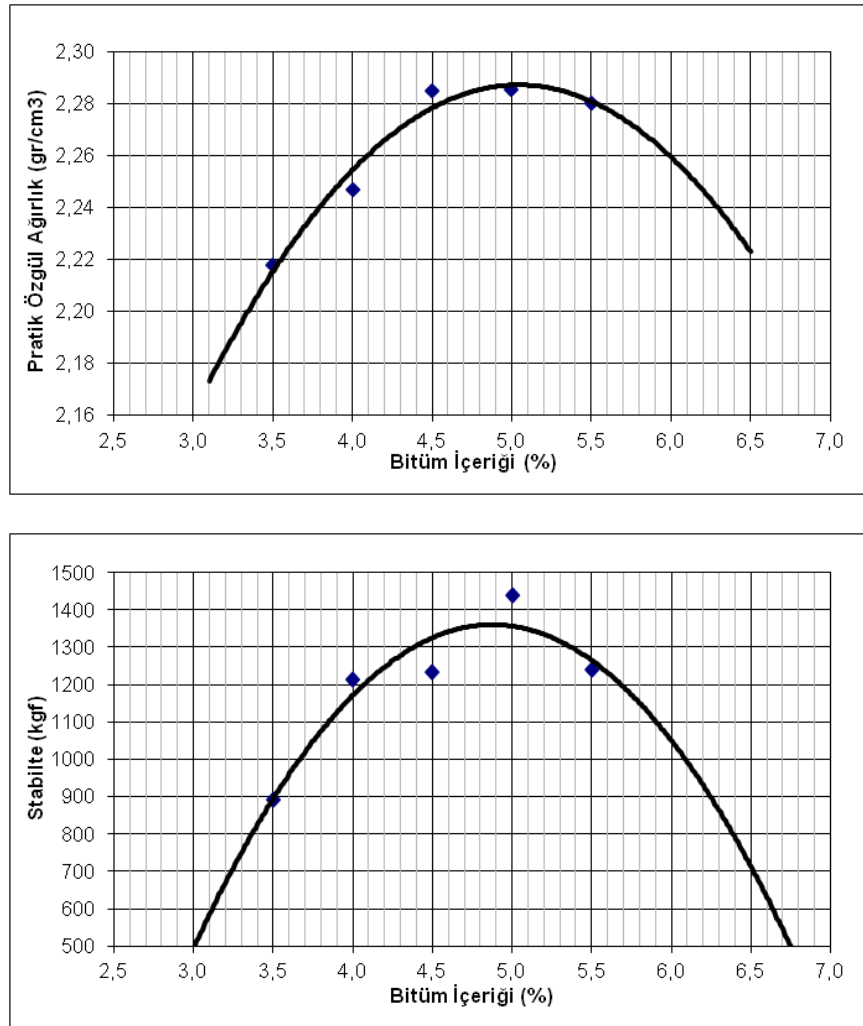


Şekil 6.26 Kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları (Devam)

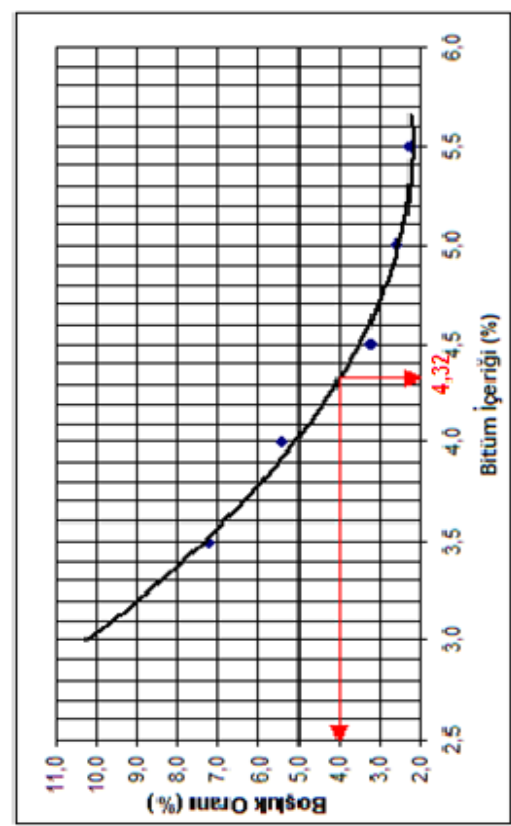
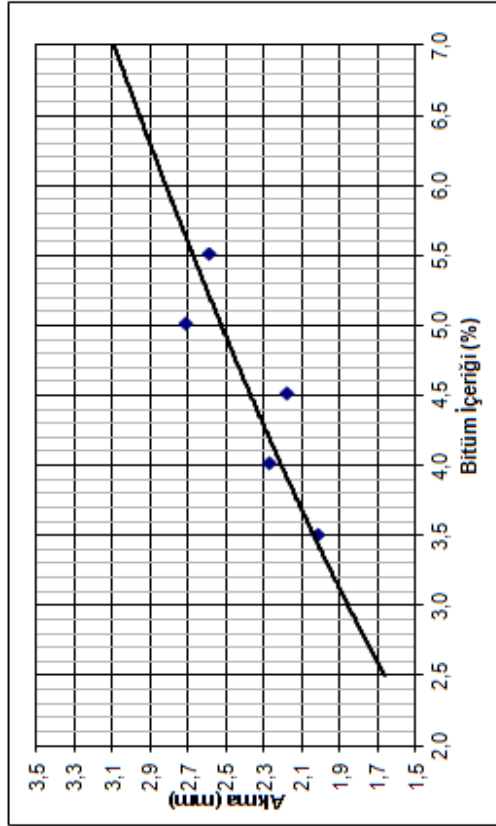
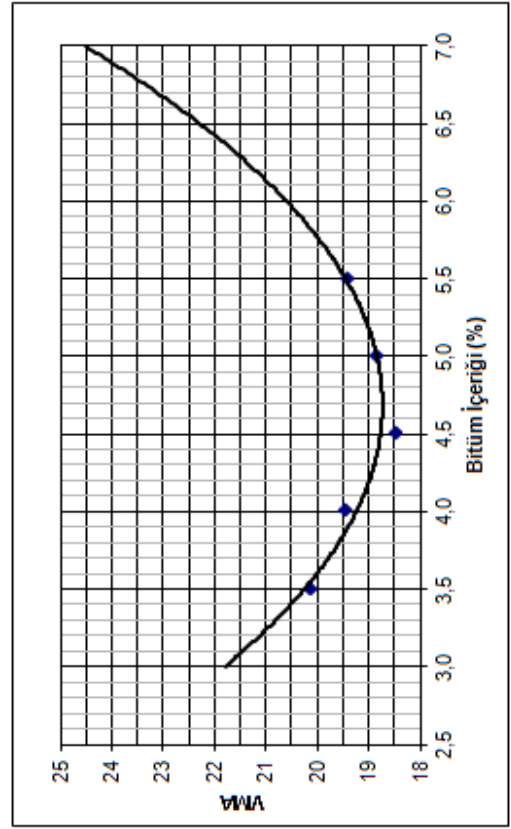
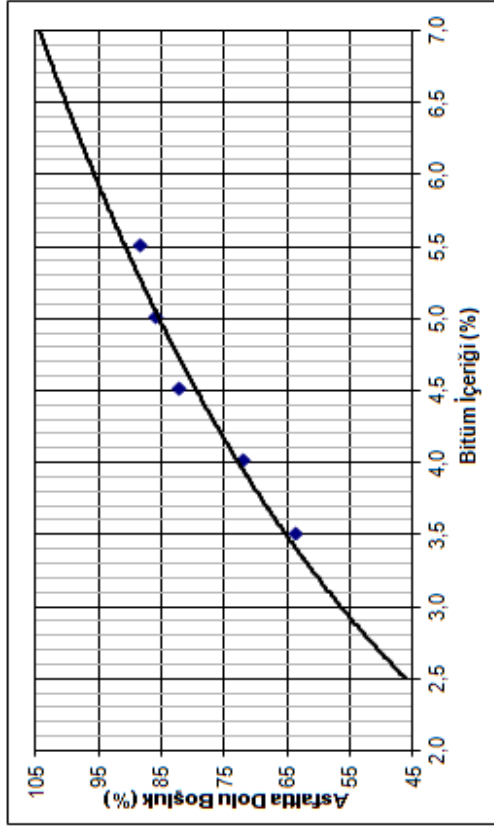
6.4.1.4 Sentetik Zeolit ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Optimum Bitüm İçeriği

Sentetik zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi amacıyla, karışıma uygulanan Marshall Deneyi sonuçları Şekil 6.27’de verilmiştir.

Şekil 6.27 incelendiğinde, sentetik zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği % 4 hava boşluğuna karşılık gelen değer olan % 4,32 olarak bulunmuş ve sentetik zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 6.27 Sentetik zeolit ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları

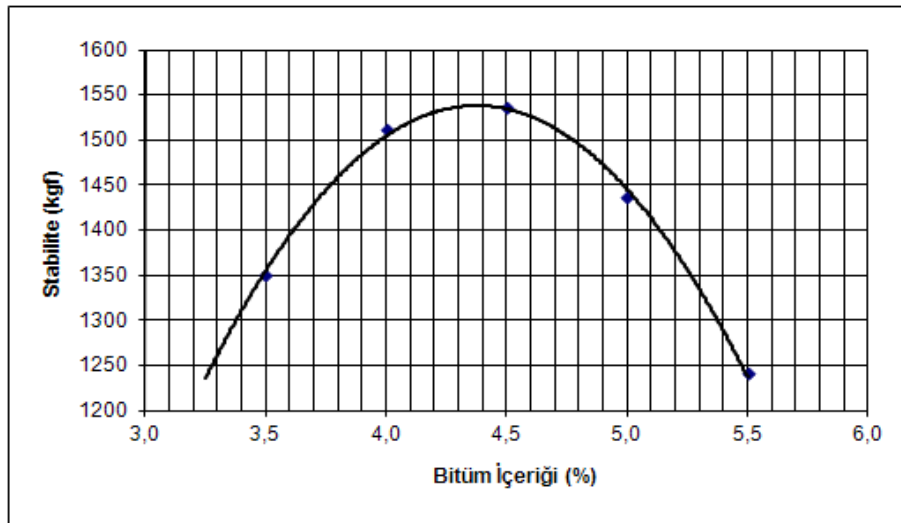
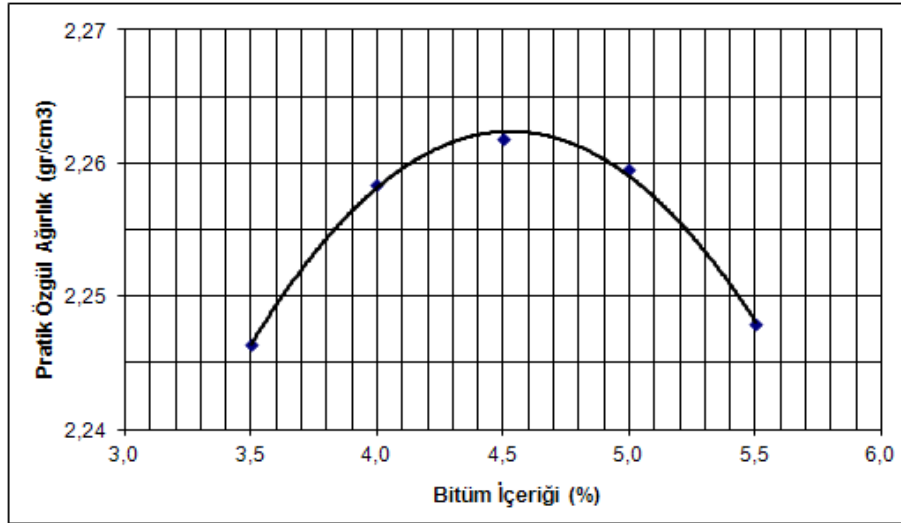


Şekil 6.27 Sentetik zeolit ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları (Devam)

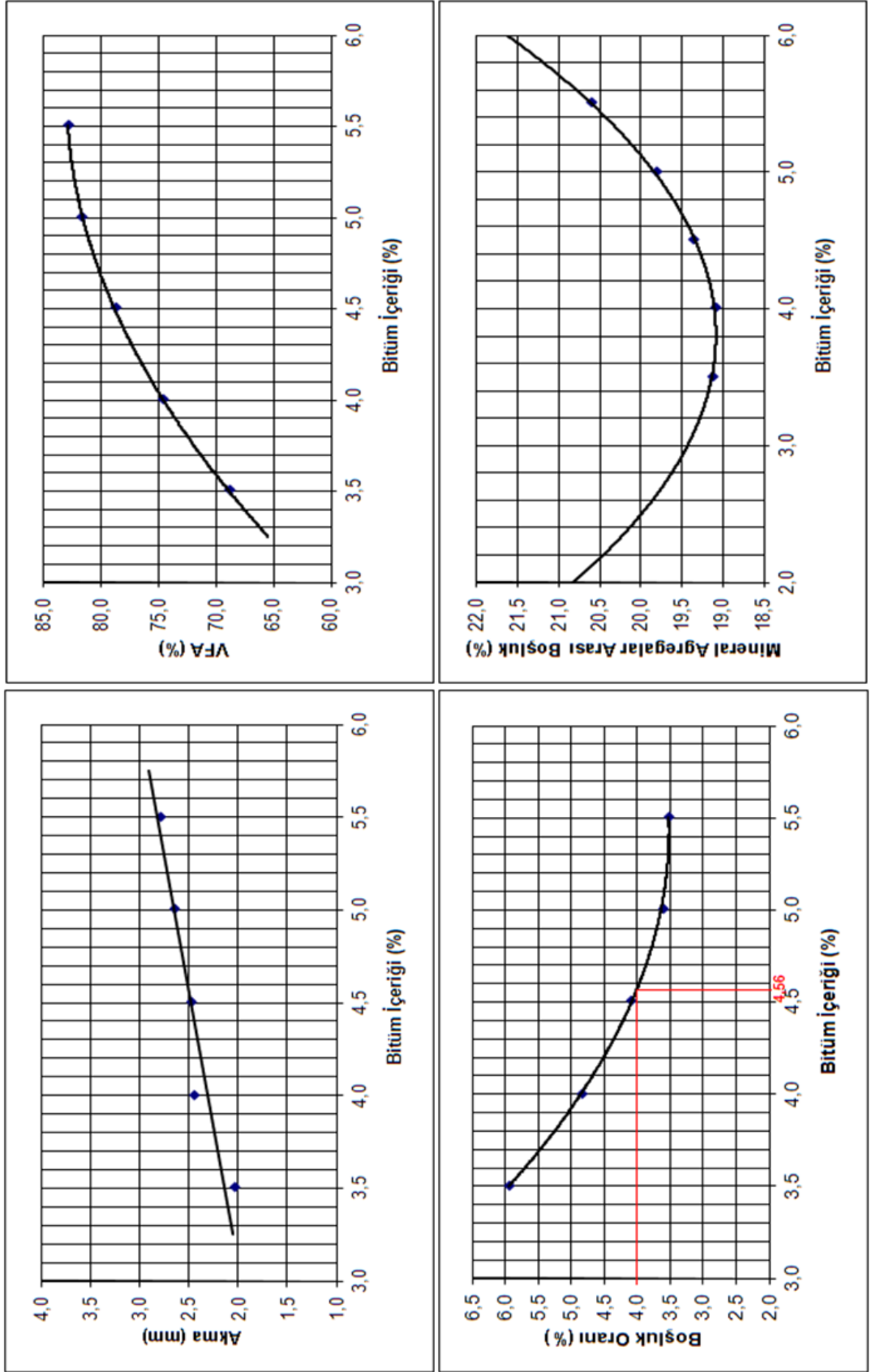
6.4.1.5 Doğal Zeolit ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Optimum Bitüm İçeriği

Doğal zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi amacıyla, karışıma uygulanan Marshall Deneyi sonuçları Şekil 6.28’de verilmiştir.

Şekil 6.28 incelendiğinde, doğal zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği % 4 hava boşluğuna karşılık gelen değer olan % 4,56 olarak bulunmuş ve doğal zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 6.28 Doğal zeolit ile hazırlanan karışım örnekleri için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları



Şekil 6.28 Doğal zeolit ile hazırlanan karışımlar için optimum bitüm içeriği tayini sonuçları (Devam)

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, her bir IKA katkısı için optimum bitüm içerikleri Tablo 6.15’te verilmiştir.

Tablo 6.15 Tüm IKA katkılara ait optimum bitüm içerikleri

IKA Katkı Cinsi	Optimum Bitüm İçeriği (%)
Saf Bitüm	4,72
Organik	4,20
Kimyasal	4,46
Sentetik Zeolit	4,32
Doğal Zeolit	4,56

6.4.2 Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Sonuçları

Her bir IKA katkısı için optimum bitüm içerikleri tespit edildikten sonra, IKA içeriğinin stabilite ve akma parametreleri üzerine etkisi belirlenmiştir.

Tez kapsamında uygulanan deneysel çalışmalarda, Marshall aletinin kullanarak bitümlü karışımların plastik akmaya karşı direnci için standart metot olan ASTM D 1559 yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, Marshall aleti yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindirik numunelerin yanal yüzlerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsamaktadır. Numuneler, bu yöntemeye uygun hazırlanarak yoğunluk ve boşluk özellikleri saptanmış, maksimum yük ve akma değerleri tespit edilmiştir.

Deneyde, her bir IKA katkı ve içeriği için farklı bitüm yüzdeleri kullanılarak 3’er numune hazırlanmıştır.

Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak belirtildiği gibi, AASHTO T 312-01’e göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tayininde kullanılan viskozite değerleri sırasıyla 170 ± 20 mPa.s ve 280 ± 30 mPa.s’dir. Bu değerlere karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Tüm IKA katkı ve farklı içerikleri ile hazırlanan Marshall stabilite ve akma deneyine ait sonuçlar Tablo 6.16’da verilmiştir.

Tablo 6.16 Tüm İKA katkı ve içerikleri ile hazırlanan Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları

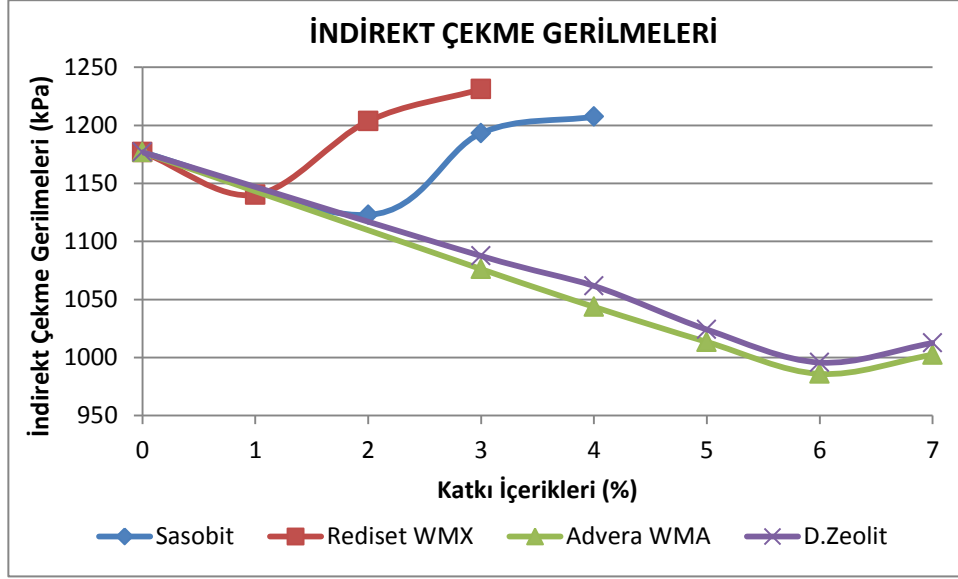
Katkılar	Katkı İçeriği (%)	Ort.Düz.Stab. (kgf)	Ort.Akma (mm)
SAF BİTÜM	<i>0</i>	<i>1191</i>	<i>2,77</i>
Organik	<i>2</i>	<i>1219</i>	<i>2,20</i>
	<i>3</i>	<i>1462</i>	<i>2,55</i>
	<i>4</i>	<i>1208</i>	<i>1,83</i>
Kimyasal	<i>1</i>	<i>1166</i>	<i>2,50</i>
	<i>2</i>	<i>1280</i>	<i>2,31</i>
	<i>3</i>	<i>1258</i>	<i>2,44</i>
	<i>4</i>	<i>1270</i>	<i>1,97</i>
Sentetik Zeolit	<i>2</i>	<i>1121</i>	<i>2,39</i>
	<i>3</i>	<i>1308</i>	<i>2,40</i>
	<i>4</i>	<i>1205</i>	<i>2,55</i>
	<i>5</i>	<i>1225</i>	<i>2,23</i>
	<i>6</i>	<i>1241</i>	<i>2,11</i>
	<i>7</i>	<i>1305</i>	<i>2,05</i>
Doğal Zeolit	<i>2</i>	<i>1109</i>	<i>2,33</i>
	<i>3</i>	<i>1335</i>	<i>2,19</i>
	<i>4</i>	<i>1257</i>	<i>2,73</i>
	<i>5</i>	<i>1523</i>	<i>2,50</i>
	<i>6</i>	<i>1337</i>	<i>2,45</i>
	<i>7</i>	<i>1419</i>	<i>2,08</i>

Tablo 6.16'dan da anlaşılacağı üzere, her bir İKA katkı ve içeriği ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri, saf bitüm içeren karışımın özellikleri ile karşılaştırıldığında Marshall stabilite değerlerinin arttığı, akma değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Tüm katkı içerikleri için, Marshall stabilite değerleri şartname alt sınır olan 900 kgf'un üzerindedir. Maksimum stabilite değerlerine %3 organik İKA katkısında; %2 kimyasal İKA katkısında; %3 sentetik zeolit İKA katkısında ve %5 doğal zeolit katkısında erişilmiştir.

Tablo 6.16 akma değerleri bakımından incelendiğinde, %4 organik ve kimyasal İKA katkısında akma değerleri için şartname alt sınırı olan 2,0 mm sağlanamamıştır. İKA katkı içeriği artışıyla, sentetik ve doğal zeolit için akma değerleri büyük değişimler göstermemiştir.

6.4.3 İndirekt Çekme Gerilmesi Deneyi Sonuçları

Şekil 6.29’da tez kapsamında kullanılan her bir IKA katkı için belirlenen optimum katkı içerikleriyle hazırlanan bitümlü karışım örneklerine ait İndirekt Çekme Gerilmesi Deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.29 İndirekt çekme gerilmesi deney sonuçları

Şekil 6.29 incelendiğinde, organik ve kimyasal IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinde İndirekt Çekme Gerilmeleri’nin başlangıçta saf bitüm ile hazırlanan örneklere göre azaldığı, daha sonra ise arttığı görülmektedir. Bu iki IKA katkısı birbirleri ile karşılaştırıldığında, kimyasal IKA katkısının organik IKA katkısına göre bir miktar daha yüksek oranda çekme gerilmesini karşılayabildiği belirlenmiştir. Yine organik ve kimyasal IKA katkıları ile ilgili olarak, önceden belirlenen optimum katkı oranları ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinden itibaren sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.

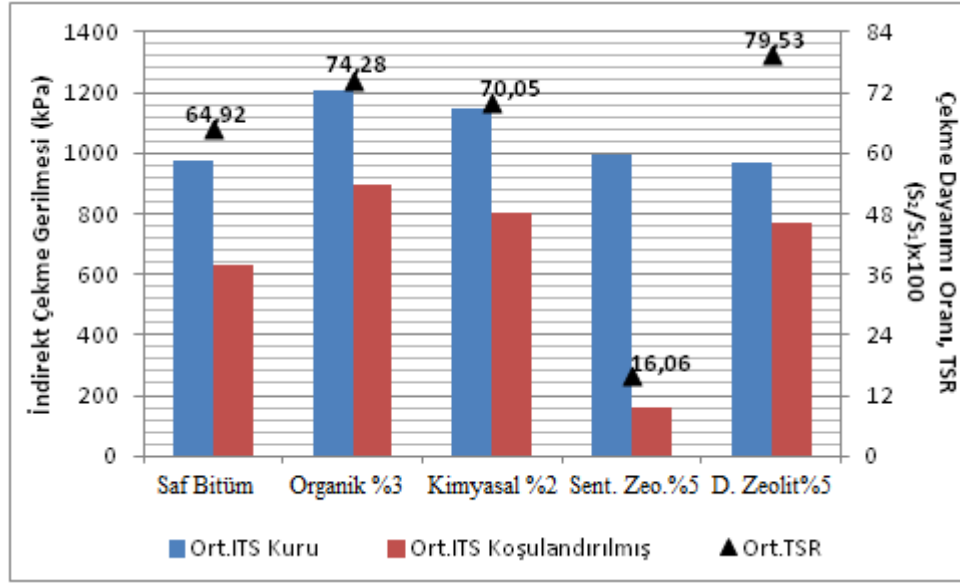
Bunların yanı sıra sentetik ve doğal zeolit katkıları ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinde ise katkı oranı arttıkça sertliğin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, IKA üretimi sırasında hem sentetik hem de doğal zeolitin bitüm içerisinde tamamen erimeyerek, homojen bir şekilde karışmaması söylenebilir. Üretim sırasında erimeyen sentetik ve doğal zeolit partikülleri bir araya gelerek

topaklanmakta ve kısmi çökelmeye neden olmaktadır. Bunlara örnek olarak, sentetik ve doğal zeolitlerin depolama stabilitesi değerlerinin organik ve kimyasal katkı maddelerine göre daha yüksek çıkması gösterilebilir. Ayrıca, üretim sırasında sentetik ve doğal zeolitlerin yapısındaki kılcal tüp hava boşlukları içerisinde kalan nem ve/veya su buharı nedeniyle adezyon durumunun bozulması da göz önüne alınması gereken bir faktördür. Hem sentetik hem de doğal zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için, %7 katkı içeriklerinde indirekt çekme gerilmesi değerlerinde bir miktar artış görülmektedir. Sentetik ve doğal zeolitlerin bitüm içerisindeki yüksek katkı oranları filler etkisi yaratarak bitümlü karışım örneklerinde sertleşmeye neden olmaktadır. Sentetik zeolit ile doğal zeolit birbirleri içerisinde değerlendirildiğinde, doğal zeolit bitümlü karışımların sertliğini sentetik zeolite göre daha da arttırdığı görülmüştür.

6.4.4 Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Dirençlerinin Saptanması (AASHTO T283)

Her bir IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışımların suya bağlı bozulmalara karşı dayanımının tespit edilmesi amacıyla AASHTO T 283 “Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci İçin Standart Deney Metodu” kullanılmıştır. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bu yöntem, laboratuarda sıkıştırılmış bitümlü karışım örneklerinin hızlandırılmış olarak suya koşullandırma ve doygunluk etkilerinin değerlendirmek için uygulanmaktadır.

Her bir IKA katkı maddesi için önceden belirlenmiş olan optimum katkı içerikleri ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilenler Şekil 6.30’da verilmiştir. Deneylerde seçilen IKA katkılara ait içerikler üretici firmaların tavsiyeleri doğrultusunda ve belirtilen oranlarda kullanılmıştır.



Şekil 6.30 Her bir IKA katısıyla optimum katkı içeriklerinde hazırlanmış bitümlü karışım örneklerine ait ITS ve TSR değerleri

Şekil 6.30 karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerini ifade eden TSR (tensile strength ratio–çekme dayanım oranı) bakımından incelendiğinde, organik, kimyasal ve doğal zeolit IKA katkısı içeren numunelere ait TSR oranının saf bitüme ait TSR oranından yüksek değer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte, sentetik zeolit içeren IKA katkısına ait TSR değeri saf bitüme ait TSR değeri ile kıyaslandığında, oldukça düşük bir değer göstermiştir. Bu durum, saf bitümlü hazırlanan karışımların suya karşı duyarlılıklarının sentetik zeolit dışındaki tüm IKA katkıları ile azaltılabildiğini ifade etmektedir. Bunun yanında tüm IKA katkıları birbirleriyle karşılaştırıldığında, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı en yüksek direncin doğal zeolit içeren bitümlü karışımlarda sağlandığı tespit edilmiştir.

BÖLÜM YEDİ

ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN FAYDA–MALİYET ANALİZİ

IKA katkılarıyla hazırlanan bitümlü karışımlar, üretim süreçlerinin farklı aşamalarında hem enerjinin korunumu hem de maliyetlerin düşürülmesinde başarı sağlamaktadır. Bu durum büyük oranda, kullanılan IKA katkının cinsine ve üretim sıcaklıklarındaki düşüşe bağlıdır. Sağlanan enerji tasarrufuna bağlı olarak elde edilen ekonomik fayda, üretim sırasında harcanan yakıtın miktarındaki azalma ile birlikte değerlendirilmelidir.

Maliyet analizleri genel olarak aşağıda belirtilen üç adımda yapılmaktadır:

- Fayda hesabı
- Maliyet hesabı
- Nihai maliyetin belirlenmesi

Fayda – maliyet analizi, IKA’ların BSK’lara göre avantaj ve dezavantajlarının belirlenebilmesi ve bu konuda bir öngörü oluşturulabilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığında bir otoyol bölümü fayda – maliyet analizi için seçilmiştir. Nakliye maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, bitüm ve bitümlü karışımın taşınması, bu analizin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Bu bağlamda, rafineri ile asfalt plenti arasındaki mesafe net olarak bilinmelidir. Değerlendirmesi yapılan tüm durumlarda bitümlü malzemenin temin edildiği yer olarak TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi, üretim yeri olarak da İzmir – Pınarbaşı mevkiinde bulunan Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.’ye ait asfalt plenti seçilmiştir. Belirlenen bu iki nokta arasındaki mesafe 65 km olarak ölçülmüştür. Yapılan analizlerde asfalt plenti ile serim sahası arasındaki mesafe ise “M” ile gösterilmiştir.

7.1 Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) için Yapılan Örnek Analiz

Analiz kapsamında fayda – maliyet değerlendirmesi için Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) 2013 yılı itibari ile hazırlamış olduğu birim fiyat listesi kullanılmıştır.

Aşağıdaki birim fiyatlar, 2013 yılı itibariyle 1 ton bitümlü karışımın hazırlanmasında kullanılan fiyatlarıdır.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2013 yılı Yol, Köprü, Bitümlü Kaplamalar ve Trafik İşaretlerine ait birim fiyat listesinde bu işlere ait **2013 Yılı fiyatı 79,58 TL/ton** olarak belirlenmiştir.

5 cm kalınlığında ve 1m² asfalt kaplama uygulamasının maliyeti ise yoğunluk 2,4 ton/m³ olarak alınarak;

$$79,58 \text{ TL/ton} \times 2,4 \times 0,05 = \underline{\underline{9,55 \text{ TL/m}^2}} \text{ olarak hesaplanır.}$$

- Toplam bazalt – kalker agregası karışımı fiyatı (belirlenen gradasyona ait tüm elek çapları için) A: 81,36 TL/ton

Bitümlü malzeme bedeli:

Bitüm fiyatı petrol fiyatlarına endeksli olduğu için fiyatı günden güne değişebilmektedir. İzmir ilinde kullanılan B 50/70 penetrasyonlu bitümün TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi çıkış fiyatı 15.02.2014 tarihi itibari ile KDV dahil 1.321,08 TL/ton dur.

Asfalt betonu aşınma tabakasında yaklaşık %4,72 oranına bitüm kullanıldığı göz önüne alınarak 1 ton asfaltta 0,0472 ton bitüm kullanılmaktadır. O halde 1 ton asfalta giren bitümün bedeli:

$$B = 1.321,08 \text{ TL/ton} \times 0,0472 \text{ ton} = 62,35 \text{ TL/ton}$$

Bitümlü malzemenin teslim yerinden depo tankına kadar taşınması:

Asfalt karışımlarının Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerinde (Pınarbaşı-İzmir) yapıldığı kabul edilerek hesap yapıldığında, TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi'nden Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerine olan mesafe İzmir 3 Boyutlu kent rehberi programından 65 km olarak ölçülmüştür.

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$F = K (0.0007 M + 0.01) \text{ TL/Ton } M=\text{km olarak}$$

$$F = 145 \times (0.0007 \times 65 + 0.01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Tez kapsamında saf bitüm ile hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği %4,72 olarak hesaplanmıştır. 1 ton bitümlü karışım için gereken bitüm miktarına ait nakliye bedeli;

$$B_{R \rightarrow P} = 8,0475 \text{ TL/ton} * 0,0472 \text{ ton} = 0,379842 \text{ TL/ton'dur.}$$

Bitümlü karışımın işbaşına kadar taşınması:

M≤10 km olan taşımalar (Poz No. 07.005) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \S} = K \times 0,0017 \times \sqrt{M} \text{ TL/ton}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times 0,0017 \times \sqrt{M}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 0,0247 \times \sqrt{M}$$

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \S} = K (0,0007 \times M + 0,01) \text{ TL/ton}$$

M = km olarak malzemenin taşınacağı mesafeyi göstermektedir.

Aliğa Rafinerisi ile Ege Asfalt Tesisleri arasındaki mesafe 65 km olduğundan;

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01) = 8,0475 \text{ TL/ton}$$

Bu formül içerisinde bitümün temin edildiği yer ile depolanacak alana kadar olan mesafe farklılık göstereceğinden, hesaplamalar bölümünde bu parametre “M” indisiyle gösterilecektir.

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times M + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = (0,1015 \times M + 1,45) \text{ TL/ton}$$

Bitümlü yapıştırıcının yol boyunca taşınması:

Bitümlü tabakaların yapıştırıcılığının sağlanması için metre kare başına 0,5 lt bitüm gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 ton bitümlü karışım için gereken yapıştırıcı bitüm malzemesi 0,0042 ton'dur.

$$BY = 8,0475 * 0,0042 = 0,0338 \text{ TL/ton}$$

Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması:

4358 poz bu kalemi kapsamaktadır. Bu kalemin birim fiyatı 32,36 TL/tondur.

$$I = 32,36 \text{ TL/ton} * 0,0472 = 1,53 \text{ TL/ton}$$

BSK'nın nihai maliyeti:

$M \leq 10$ taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A + B + B_{R \rightarrow P} + BK_{P \rightarrow \text{Ş}} + BY + I$$

$$\sum_{\text{Maliyet}}=(81,36)+(62,35)+(0,379842)+(0,0247\sqrt{M})+(0,0338)+(1,262128)$$

$$\sum_{\text{Maliyet}} = (145,65)+(0,0247\sqrt{M}) \text{ TL/ton}$$

M>10 taşıma mesafesi için;

$$\sum_{\text{Maliyet}} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum_{\text{Maliyet}}=(81,36)+(62,35)+(0,379842)+(0,1015xM+1,45)+(0,0338)+(1,262128)$$

$$\sum_{\text{Maliyet}} = (145,65)+(0,1015 x M) \text{ TL/ton}$$

Bu bağlamda, örnekleme yapılan 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığındaki bir BSK otoyol kesimi için maliyet aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Örnek Yolda Kullanılacak} &= \text{Uzunluk} \times \text{Genişlik} \times \text{Kalınlık} \times \text{Kaplamanın Yoğunluğu} \\ \text{Asfalt Miktarı} &= 1000 \times 10 \times 0,05 \times (2,4) \\ &= 1200 \text{ ton} \end{aligned}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti (M>10):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(145,65)+(0,0247\sqrt{M})]$$

$$\text{Maliyet} = 174.780,00+(29,64\sqrt{M}) \text{ TL}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti (M>10):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(145,65)+(0,1015 x M)]$$

$$\text{Maliyet} = 174.780,00+(121,8 x M) \text{ TL}$$

7.2 Organik IKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz

BSK ile yapılan örneklemeye benzer bir çalışma organik IKA katkı olan organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Toplam bazalt – kalker agregası karışımı fiyatı (belirlenen gradasyona ait tüm elek çapları için) A: 81,36 TL/ton

Bitümlü malzeme bedeli:

Bitüm fiyatı petrol fiyatlarına endeksli olduğu için fiyatı günden güne değişebilmektedir. İzmir ilinde kullanılan B 50/70 penetrasyonlu bitümün TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi çıkış fiyatı 15.02.2014 tarihi itibari ile KDV dahil 1.321,08 TL/ton dur.

Asfalt betonu aşınma tabakasında yaklaşık %4,20 oranına bitüm kullanıldığı göz önüne alınarak 1 ton asfaltta 0,0420 ton bitüm kullanılmaktadır. O halde 1 ton asfaltta giren bitümün bedeli:

$$B = 1.321,08 \text{ TL/ton} \times 0,042 \text{ ton} = 55,49 \text{ TL/ton}$$

Bitümlü malzemenin teslim verinden depo tankına kadar taşınması:

Asfalt karışımlarının Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerinde (Pınarbaşı-İzmir) yapıldığı kabul edilerek hesap yapıldığında, TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi'nden Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerine olan mesafe İzmir 3 Boyutlu kent rehberi programından 65 km olarak ölçülmüştür.

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$F = K (0.0007 M + 0.01) \text{ TL/Ton } M=\text{km olarak}$$

$$F = 145 \times (0.0007 \times 65 + 0.01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Tez kapsamında saf bitüm ile hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği %4,20 olarak hesaplanmıştır. 1 ton bitümlü karışım için gereken bitüm miktarına ait nakliye bedeli;

$$B_{R \rightarrow P} = 8,0475 \text{ TL/ton} * 0,0420 \text{ ton} = 0,3380 \text{ TL/ton' dur.}$$

Bitümlü karışımın işbaşına kadar taşınması:

M ≤ 10 km olan taşımlar (Poz No. 07.005) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \S} = K \times 0,0017 \times \sqrt{M} \text{ TL/ton}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times 0,0017 \times \sqrt{M}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 0,0247 \times \sqrt{M}$$

M > 10 km olan taşımlar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \S} = K (0,0007 M + 0,01) \text{ TL/Ton}$$

M = km olarak malzemenin taşınacağı mesafeyi göstermektedir.

Aliağa Rafinerisi ile Ege Asfalt Tesisleri arasındaki mesafe 65 km olduğundan;

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Bu formül içerisinde bitümün temin edildiği yer ile depolanacak alana kadar olan mesafe farklılık göstereceğinden, hesaplamalar bölümünde bu parametre “M” indisiyle gösterilecektir.

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times (0,0007 \times M + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = (0,1015 \times M + 1,45) \text{ TL/ton}$$

Bitümlü yapıştırıcının yol boyunca taşınması:

Bitümlü tabakaların yapıştırıcılığının sağlanması için metre kare başına 0,5 lt bitüm gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 ton bitümlü karışım için gereken yapıştırıcı bitüm malzemesi 0,0042 ton'dur.

$$BY = 8,0475 * 0,0042 = 0,0338 \text{ TL/ton}$$

Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması:

4358 pozu bu kalemi kapsamaktadır. Bu kalemin birim fiyatı 32,36 TL/tondur.

$$I = 32,36 \text{ TL/ton} * 0,0420 = 1,36 \text{ TL/ton}$$

Organik IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışımın nihai maliyeti:

$M \leq 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum_{\text{Maliyet}} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum_{\text{Maliyet}}=(81,36)+(55,49)+(0,3380)+(0,0247\sqrt{M})+(0,0338)+(1,36)$$

$$\sum_{\text{Maliyet}} = (138,58)+(0,0247\sqrt{M}) \text{ TL/ton}$$

$M > 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum_{\text{Maliyet}} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum_{\text{Maliyet}}=(81,36)+(55,49)+(0,3380)+(0,1015xM+1,45)+(0,0338)+(1,36)$$

$$\sum_{\text{Maliyet}} = (138,58)+(0,1015 x M) \text{ TL/ton}$$

Bu bağlamda, örnekleme yapılan 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığındaki organik IKA katkısı ile hazırlanan bir otoyol kesimi için maliyet aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}\text{Örnek Yolda Kullanılacak Asfalt Miktarı} &= \text{Uzunluk} \times \text{Genişlik} \times \text{Kalınlık} \times \text{Kaplamanın Yoğunluğu} \\ &= 1000 \times 10 \times 0,05 \times (2,4) \\ &= 1200 \text{ ton}\end{aligned}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M \leq 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(138,58) + (0,0247\sqrt{M})]$$

$$\text{Maliyet} = 166.296,00 + (29,64\sqrt{M}) \text{ TL}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M > 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(138,58) + (0,1015 \times M)]$$

$$\text{Maliyet} = 166.296,00 + (121,8 \times M) \text{ TL}$$

7.3 Kimyasal IKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz

BSK ile yapılan örneklemeye benzer bir çalışma kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Toplam bazalt – kalker agregası karışımı fiyatı (belirlenen gradasyona ait tüm elek çapları için) A: 81,36 TL/ton

Bitümlü malzeme bedeli:

Bitüm fiyatı petrol fiyatlarına endeksli olduğu için fiyatı günden güne değişebilmektedir. İzmir ilinde kullanılan B 50/70 penetrasyonlu bitümün TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi çıkış fiyatı 15.02.2014 tarihi itibari ile KDV dahil 1.321,08 TL/ton dur.

Asfalt betonu aşınma tabakasında yaklaşık %4,46 oranına bitüm kullanıldığı göz önüne alınarak 1 ton asfaltta 0,0446 ton bitüm kullanılmaktadır. O halde 1 ton asfaltta giren bitümün bedeli:

$$B = 1.321,08 \text{ TL/ton} \times 0,0446 \text{ ton} = 58,9201 \text{ TL/ton}$$

Bitümlü malzemenin teslim verinden depo tankına kadar taşınması:

Asfalt karışımlarının Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerinde (Pınarbaşı-İzmir) yapıldığı kabul edilerek hesap yapıldığında, TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi'nden Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerine olan mesafe İzmir 3 Boyutlu kent rehberi programından 65 km olarak ölçülmüştür.

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$F = K (0.0007 M + 0.01) \text{ TL/Ton } M=\text{km olarak}$$

$$F = 145 \times (0.0007 \times 65 + 0.01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Tez kapsamında saf bitüm ile hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği %4,46 olarak hesaplanmıştır. 1 ton bitümlü karışım için gereken bitüm miktarına ait nakliye bedeli;

$$B_{R \rightarrow P} = 8,0475 \text{ TL/ton} * 0,0446 \text{ ton} = 0,3589 \text{ TL/ton'dur.}$$

Bitümlü karışımın işbaşına kadar taşınması:

M≤10 km olan taşımalar (Poz No. 07.005) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \S} = K \times 0,0017 \times \sqrt{M} \text{ TL/ton}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 145 \times 0,0017 \times \sqrt{M}$$

$$BK_{P \rightarrow \S} = 0,0247 \times \sqrt{M}$$

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = K (0,0007 M + 0,01) \text{ TL/Ton}$$

M = km olarak malzemenin taşınacağı mesafeyi göstermektedir.

Aliağa Rafinerisi ile Ege Asfalt Tesisleri arasındaki mesafe 65 km olduğundan;

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Bu formül içerisinde bitümün temin edildiği yer ile depolanacak alana kadar olan mesafe farklılık göstereceğinden, hesaplamalar bölümünde bu parametre “M” indisiyle gösterilecektir.

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times M + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = (0,1015 \times M + 1,45) \text{ TL/ton}$$

Bitümlü yapıştırıcının yol boyunca taşınması:

Bitümlü tabakaların yapıştırıcılığının sağlanması için metre kare başına 0,5 lt bitüm gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 ton bitümlü karışım için gereken yapıştırıcı bitüm malzemesi 0,0042 ton'dur.

$$BY = 8,0475 * 0,0042 = 0,0338 \text{ TL/ton}$$

Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması:

4358 poz bu kalemi kapsamaktadır. Bu kalemin birim fiyatı 32,36 TL/tondur.

$$I = 32,36 \text{ TL/ton} * 0,0446 = 1,44 \text{ TL/ton}$$

Kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bitümlü karışımın nihai maliyeti:

$M \leq 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum \text{Maliyet}=(81,36)+(58,92)+(0,3589)+(0,0247\sqrt{M})+(0,0338)+(1,44)$$

$$\sum \text{Maliyet} = (142,11)+(0,0247\sqrt{M}) \text{ TL/ton}$$

$M > 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum \text{Maliyet}=(81,36)+(58,92)+(0,3589)+(0,1015xM+1,45)+(0,0338)+(1,44)$$

$$\sum \text{Maliyet} = (142,11)+(0,1015 x M) \text{ TL/ton}$$

Bu bağlamda, örnekleme yapılan 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığındaki kimyasal IKA katkısı ile hazırlanan bir otoyol kesimi için maliyet aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Örnek Yolda Kullanılacak} &= \text{Uzunluk} \times \text{Genişlik} \times \text{Kalınlık} \times \text{Kaplamanın Yoğunluğu} \\ \text{Asfalt Miktarı} &= 1000 \times 10 \times 0,05 \times (2,4) \\ &= 1200 \text{ ton} \end{aligned}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M \leq 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(142,11)+(0,0247\sqrt{M})]$$

$$\text{Maliyet} = 170.532,00+(29,64\sqrt{M}) \text{ TL}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M > 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(142,11)+(0,1015 x M)]$$

$$\text{Maliyet} = 170.532,00+(121,8 x M) \text{ TL}$$

7.4 Sentetik Zeolit Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz

BSK ile yapılan örnekleme benzer bir çalışma sentetik zeolit İKA katkı olan sentetik zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Toplam bazalt – kalker agregası karışımı fiyatı (belirlenen gradasyona ait tüm elek çapları için) A: 81,36 TL/ton

Bitümlü malzeme bedeli:

Bitüm fiyatı petrol fiyatlarına endeksli olduğu için fiyatı günden güne değişebilmektedir. İzmir ilinde kullanılan B 50/70 penetrasyonlu bitümün TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi çıkış fiyatı 15.02.2014 tarihi itibari ile KDV dahil 1.321,08 TL/ton dur.

Asfalt betonu aşınma tabakasında yaklaşık %4,32 oranına bitüm kullanıldığı göz önüne alınarak 1 ton asfaltta 0,0432 ton bitüm kullanılmaktadır. O halde 1 ton asfalta giren bitümün bedeli:

$$B = 1.321,08 \text{ TL/ton} \times 0,0432 \text{ ton} = 57,07 \text{ TL/ton}$$

Bitümlü malzemenin teslim yerinden depo tankına kadar taşınması:

Asfalt karışımlarının Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerinde (Pınarbaşı-İzmir) yapıldığı kabul edilerek hesap yapıldığında, TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi'nden Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerine olan mesafe İzmir 3 Boyutlu kent rehberi programından 65 km olarak ölçülmüştür.

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$F = K (0.0007 M + 0.01) \text{ TL/Ton } M=\text{km olarak}$$

$$F = 145 \times (0.0007 \times 65 + 0.01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Tez kapsamında saf bitüm ile hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği %4,32 olarak hesaplanmıştır. 1 ton bitümlü karışım için gereken bitüm miktarına ait nakliye bedeli;

$$B_{R \rightarrow P} = 8,0475 \text{ TL/ton} * 0,0432 \text{ ton} = 0,3477 \text{ TL/ton'dur.}$$

Bitümlü karışımın işbaşına kadar taşınması:

M≤10 km olan taşımalar (Poz No. 07.005) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = K \times 0,0017 \times \sqrt{M} \text{ TL/ton}$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times 0,0017 \times \sqrt{M}$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 0,247 \times \sqrt{M}$$

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = K (0,0007 M + 0,01) \text{ TL/Ton}$$

M = km olarak malzemenin taşınacağı mesafeyi göstermektedir.

Aliağa Rafinerisi ile Ege Asfalt Tesisleri arasındaki mesafe 65 km olduğundan;

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Bu formül içerisinde bitümün temin edildiği yer ile depolanacak alana kadar olan mesafe farklılık göstereceğinden, hesaplamalar bölümünde bu parametre “M” indisiyle gösterilecektir.

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times M + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = (0,1015 \times M + 1,45) \text{ TL/ton}$$

Bitümlü yapıştırıcının yol boyunca taşınması:

Bitümlü tabakaların yapıştırıcılığının sağlanması için metre kare başına 0,5 lt bitüm gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 ton bitümlü karışım için gereken yapıştırıcı bitüm malzemesi 0,0042 ton'dur.

$$BY = 8,0475 * 0,0042 = 0,0338 \text{ TL/ton}$$

Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması:

4358 pozu bu kalemi kapsamaktadır. Bu kalemin birim fiyatı 32,36 TL/tondur.

$$I = 32,36 \text{ TL/ton} * 0,0432 = 1,40 \text{ TL/ton}$$

Sentetik zeolit ile hazırlanan bitümlü karışımın nihai maliyeti:

$M \leq 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A + B + B_{R \rightarrow P} + BK_{P \rightarrow \text{Ş}} + BY + I$$

$$\sum \text{Maliyet} = (81,36) + (62,35) + (0,3477) + (0,0247\sqrt{M}) + (0,0338) + (1,40)$$

$$\sum \text{Maliyet} = (145,4915) + (0,0247\sqrt{M}) \text{ TL/ton}$$

M>10 km taşıma mesafesi için;

$$\sum_{\text{Maliyet}} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum_{\text{Maliyet}}=(81,36)+(62,35)+(0,3477)+(0,1015 \times M+1,45)+(0,0338)+(1,40)$$

$$\sum_{\text{Maliyet}} = (145,4915)+(0,1015 \times M) \text{ TL/ton}$$

Bu bağlamda, örnekleme yapılan 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığındaki sentetik zeolit ile hazırlanan bir otoyol kesimi için maliyet aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Örnek Yolda Kullanılacak Asfalt Miktarı} &= \text{Uzunluk} \times \text{Genişlik} \times \text{Kalınlık} \times \text{Kaplamanın Yoğunluğu} \\ &= 1000 \times 10 \times 0,05 \times (2,4) \\ &= 1200 \text{ ton} \end{aligned}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti (M≤10 km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(145,4915)+(0,0247\sqrt{M})]$$

$$\text{Maliyet} = \mathbf{174.589,80+(29,64\sqrt{M}) \text{ TL}}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti (M>10 km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(145,4915)+(0,1015 \times M)]$$

$$\text{Maliyet} = \mathbf{174.589,80+(121,8 \times M) \text{ TL}}$$

7.5 Doğal Zeolit İKA Katkısı ile Hazırlanan Bitümlü Karışımlar için Yapılan Örnek Analiz

BSK ile yapılan örneklemeye benzer bir çalışma Doğal Zeolit ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Toplam bazalt – kalker agregası karışımı fiyatı (belirlenen gradasyona ait tüm elek çapları için) A: 81,36 TL/ton

Bitümlü malzeme bedeli:

Bitüm fiyatı petrol fiyatlarına endeksli olduğu için fiyatı günden güne değişebilmektedir. İzmir ilinde kullanılan B 50/70 penetrasyonlu bitümün TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi çıkış fiyatı 15.02.2014 tarihi itibari ile KDV dahil 1.321,08 TL/ton dur.

Asfalt betonu aşınma tabakasında yaklaşık %4,56 oranına bitüm kullanıldığı göz önüne alınarak 1 ton asfaltta 0,0456 ton bitüm kullanılmaktadır. O halde 1 ton asfaltta giren bitümün bedeli:

$$B = 1.321,08 \text{ TL/ton} \times 0,0456 \text{ ton} = 60,2412 \text{ TL/ton}$$

Bitümlü malzemenin teslim yerinden depo tankına kadar taşınması:

Asfalt karışımlarının Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerinde (Pınarbaşı-İzmir) yapıldığı kabul edilerek hesap yapıldığında, TÜPRAŞ İzmir – Aliğa Rafinerisi'nden Ege Asfalt Maden İnşaat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye ait asfalt plenti tesislerine olan mesafe İzmir 3 Boyutlu kent rehberi programından 65 km olarak ölçülmüştür.

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$F = K (0.0007 M + 0.01) \text{ TL/Ton } M=\text{km olarak}$$

$$F = 145 \times (0.0007 \times 65 + 0.01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Tez kapsamında saf bitüm ile hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği %4,56 olarak hesaplanmıştır. 1 ton bitümlü karışım için gereken bitüm miktarına ait nakliye bedeli;

$$B_{R \rightarrow P} = 8,0475 \text{ TL/ton} * 0,0456 \text{ ton} = 0,3670 \text{ TL/ton'dur.}$$

Bitümlü karışımın işbaşına kadar taşınması:

M≤10 km olan taşımalar (Poz No. 07.005) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = K \times 0,0017 \times \sqrt{M} \text{ TL/ton}$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times 0,0017 \times \sqrt{M}$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 0,0247 \times \sqrt{M}$$

M>10 km olan taşımalar (Poz No. 07.006) için nakliye formülü uygulandığında:

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = K (0,0007 M + 0,01) \text{ TL/Ton}$$

M = km olarak malzemenin taşınacağı mesafeyi göstermektedir.

Aliğa Rafinerisi ile Ege Asfalt Tesisleri arasındaki mesafe 65 km olduğundan;

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times 65 + 0,01) = 8,0475 \text{ TL/Ton}$$

Bu formül içerisinde bitümün temin edildiği yer ile depolanacak alana kadar olan mesafe farklılık göstereceğinden, hesaplamalar bölümünde bu parametre “M” indisiyle gösterilecektir.

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = 145 \times (0,0007 \times M + 0,01)$$

$$BK_{P \rightarrow \text{Ş}} = (0,1015 \times M + 1,45) \text{ TL/ton}$$

Bitümlü yapıştırıcının yol boyunca taşınması:

Bitümlü tabakaların yapıştırıcılığının sağlanması için metre kare başına 0,5 lt bitüm gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 ton bitümlü karışım için gereken yapıştırıcı bitüm malzemesi 0,0042 ton'dur.

$$BY = 8,0475 * 0,0042 = 0,0338 \text{ TL/ton}$$

Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması:

4358 poz bu kalemi kapsamaktadır. Bu kalemin birim fiyatı 32,36 TL/tondur.

$$I = 32,36 \text{ TL/ton} * 0,0456 = 1,4756 \text{ TL/ton}$$

Doğal Zeolit ile hazırlanan bitümlü karışımın nihai maliyeti:

$M \leq 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum \text{Maliyet}=(81,36)+(60,2412)+(0,3670)+(0,0247\sqrt{M})+(0,0338)+(1,4756)$$

$$\sum \text{Maliyet} = (143,4776)+(0,0247\sqrt{M}) \text{ TL/ton}$$

$M > 10$ km taşıma mesafesi için;

$$\sum \text{Maliyet} = A+B+B_{R \rightarrow P}+BK_{P \rightarrow \text{Ş}} +BY+I$$

$$\sum \text{Maliyet}=(81,36)+(60,2412)+(0,3670)+(0,1015xM+1,45)+(0,0338)+(1,4756)$$

$$\sum \text{Maliyet} = (143,4776)+(0,1015 \times M) \text{ TL/ton}$$

Bu bağlamda, örnekleme yapılan 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 5 cm kalınlığındaki Doğal Zeolit ile hazırlanan bir otoyol kesimi için maliyet aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Örnek Yolda Kullanılacak} &= \text{Uzunluk} \times \text{Genişlik} \times \text{Kalınlık} \times \text{Kaplamanın Yoğunluğu} \\ \text{Asfalt Miktarı} &= 1000 \times 10 \times 0,05 \times (2,4) \\ &= 1200 \text{ ton} \end{aligned}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M \leq 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(143,4776) + (0,0247\sqrt{M})]$$

$$\text{Maliyet} = 172.173,12 + (29,64\sqrt{M}) \text{ TL}$$

Örnek Yolda Kullanılacak Bitümlü Karışımın Maliyeti ($M > 10$ km):

$$\text{Maliyet} = 1200 \times [(143,4776) + (0,1015 \times M)]$$

$$\text{Maliyet} = 172.173,12 + (121,8 \times M) \text{ TL}$$

Yapılan fayda–maliyet analizleri sonucunda elde edilenlere ek olarak, her bir IKA katkıya ait malzeme fiyatları ile oluşturulan örneklem için belirlenen nihai maliyetler Tablo 7.1’de verilmektedir.

Tablo 7.1 incelendiğinde, tüm IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışım örnekleri saf bitüm ile hazırlanan örneklerle karşılaştırıldığında, 1 km’lik örnek yol için en fazla maliyet kimyasal IKA katkısı olan Rediset® WMX ile hazırlanan yol kesimine aittir. Bununla birlikte, sentetik ve doğal zeolit içeren örnek yola ait maliyet, saf bitüm ile hazırlanan örnek yola göre daha düşüktür. Yapılan fayda – maliyet analizine göre 1 km’lik örnek yol için en düşük maliyetin Doğal Zeolit içeren bitümlü kaplamaya ait olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.1 Her bir IKA katkıya ait belirlenen nihai maliyetler

İMALAT KALEMLERİ	SAF BİTÜM	İLİK KARIŞIM ASFALT KATKILAR			
		ORGANİK	KİMYASAL	SENTETİK ZEOLİT	DOĞAL ZEOLİT
Agrega fiyatı (Bazalt+Kalker) (TL/ton)	81,36	81,36	81,36	81,36	81,36
Bitümlü malzeme bedeli (TL/ton)	62,35	55,49	58,92	62,35	60,24
Bitümün teslim yerinden siloya taşınması (TL/ton)	0,3798	0,338	0,3589	0,3477	0,367
Bitümlü karışımın inşaa sahasına taşınması (TL/ton), $M \leq 10$ km	$0,0247\sqrt{M}$	$0,0247\sqrt{M}$	$0,0247\sqrt{M}$	$0,0247\sqrt{M}$	$0,0247\sqrt{M}$
Bitümlü karışımın inşaa sahasına taşınması (TL/ton), $M > 10$ km	$0,1015M + 1,45$	$0,1015M + 1,45$	$0,1015M + 1,45$	$0,1015M + 1,45$	$0,1015M + 1,45$
Bitümlü yapıştırıcının rafineriden Ege Asfalt'a taşınması (TL/ton)	0,0338	0,0338	0,0338	0,0338	0,0338
Soğuyan bitümün ısıtılması (TL/ton)	1,53	1,36	1,44	1,4	1,48
Katkı bedeli (TL/ton)	-	7,02	4,93	3,19	0,86
1 ton bitümlü karışımın fiyatı (TL), $M \leq 10$ km	$145,65 + 0,0247\sqrt{M}$	$138,58 + 0,0247\sqrt{M}$	$142,11 + 0,0247\sqrt{M}$	$145,49 + 0,0247\sqrt{M}$	$143,48 + 0,0247\sqrt{M}$
1 ton bitümlü karışımın fiyatı (TL), $M > 10$ km	$145,65 + 0,1015M$	$138,58 + 0,1015M$	$142,11 + 0,1015M$	$145,49 + 0,1015M$	$143,48 + 0,1015M$
1 km’lik kısım için yapım maliyeti (TL), $M \leq 10$ km	$174780,00 + 29,64\sqrt{M}$	$166296,00 + 29,64\sqrt{M}$	$170532,00 + 29,64\sqrt{M}$	$174589,80 + 29,64\sqrt{M}$	$172173,12 + 29,64\sqrt{M}$
1 km’lik kısım için yapım maliyeti (TL), $M > 10$ km	$174780,00 + 121,8M$	$166296,00 + 121,8M$	$170532,00 + 121,8M$	$174589,80 + 121,8M$	$172173,12 + 121,8M$
1 km’lik kısım için yapım maliyeti (TL), $M \leq 10$ km	174873,73	166389,73	170625,73	174683,53	172266,85
1 km’lik kısım için yapım maliyeti (TL), $M = 50$ km	180870,00	172386,00	176622,00	180679,80	178263,12

Yukarıda hesaplanan maliyetler bitümlü karışım ve nakliye maliyetlerini içermekte olup, sıcak karışım asfaltlar yerine ılık karışım asfaltların kullanılması söz konusu olduğunda üretim aşamasında üretim sıcaklığının azalmasından kaynaklanan enerji maliyetleri ve emisyon azalmasından kaynaklanan çevre ve insan sağlığına zararlarının ekonomik analizinin yapılması gerekmektedir.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve ayrıntılı literatür araştırmalarından elde edilenler ışığında, IKA katkıların son on yıllık süreçte performans, hizmet ömründeki verimlilik ve çevresel etki değerleri açılarından BSK'lara ciddi bir alternatif olarak ön plana çıktığı bir gerçektir.

Çalışmada organik katkı sınıfından Sasobit[®], kimyasal IKA katkı sınıfından Rediset[®] WMX, sentetik zeolit IKA katkısı olarak Advera[®] WMA ve doğal zeolit bitüm içerisine farklı içeriklerde eklenerek öncelikle geleneksel bitüm deneyleri uygulanmış, ardından ayrıntılı reolojik analizler yapılmıştır. Bununla birlikte, adı geçen katkıların bitümlü sıcak karışım içerisindeki davranışını tespit etmek amacıyla Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme ve suya bağlı duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Geleneksel bitüm deneylerinden elde edilenlere göre, IKA katkılı bitüm örneklerinin sertliği arttırdığı ve ısıya karşı duyarlılığı azalttığı belirlenmiştir. Depolama stabilitesi deneyleri, Doğal zeolit IKA katkısı içeren bitüm örneklerinin diğer IKA katkısı içeren bitüm örnekleri ile benzer özellik ve performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca geleneksel bitüm deneylerinden elde edilenlere göre, kimyasal IKA katkısı olan Rediset[®] WMX diğer IKA katkılara göre en iyi depolama özelliklerinin göstermiştir.

Brookfield viskozite deneyi sonuçları dikkate alındığında, bitüme organik ve kimyasal IKA katkı ilavesi karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmekte ve böylelikle bitümlü karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte, bitüme %5 sentetik ve doğal zeolit içeriğinden fazla katkı eklenmesi ile bitümü daha viskoz hale getirdiği, dolayısı ile saf bitüme göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını arttırdığı gözlenmiştir. Belirtilenlere ek olarak, saf bitüme eklenen farklı IKA katkı ve içerikleri bitümün kısa dönem yaşlanma özelliklerini olumlu yönde arttırdığı söylenebilir. Bir diğer ifade ile, çalışma kapsamında kullanılan katkıların bitümün silo

halinde bekletilmesi, agrega ile karıştırılması, inşaat alanına taşınması, serim ve sıkıştırılmasındaki yaşlanma etkilerini azaltmaktadır. Dinamik kayma reometresi deneyinden elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri, saf bitüme ilave edilen organik IKA katkısı dışında kalan diğer katkıların, bitümün PG üst sınıfını değiştirmedeğini göstermiştir. Diğer bir değişle, karışımların tekerlek izine karşı direncini gösteren $G^*/\sin\delta$ değeri üzerinde organik IKA katkısının etkisi oldukça önemlidir.

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi ile düşük ve yüksek frekanslarda yapılan ayrıntılı çalışmalar sonucunda, farklı sıcaklıklar için frekansın artması ve sıcaklığın azalmasıyla birlikte kompleks kayma modül (G^*) değerlerinin arttığı görülmüştür. G^* değerlerindeki bu artış faz açılarıyla (δ) birlikte değerlendirildiğinde, bitüm örneklerinin elastik davranış özelliklerini etkilediğini göstermektedir. G^* değerleri dikkate alındığında, sentetik zeolit IKA katkısı olan Advera® WMA ile doğal zeolit arasında önemli bir fark olmadığı, her iki IKA katkısı için de optimum katkı içeriğinin %5 olabileceği tespit edilmiştir. Bunla birlikte, organik IKA katkısı olan Sasobit® için optimum katkı içeriği %3, kimyasal IKA katkısı olarak Rediset® WMX için ise %2 olduğu belirlenmiştir.

Bitüm içerisine IKA katkı eklenmesinin etkileri IKA katkı içeren bitüm örneklerine ait kompleks kayma modül değerlerinin saf bitümün kompleks kayma modül değerine oranı şeklinde ifade edilen modifikasyon indeksi (MI) ile değerlendirilmiştir. MI değerlerinden elde edilenler ışığında, bitüme %6 oranında Doğal zeolit ilavesi tüm sıcaklıklar için düşük ve yüksek frekanslarda –MI değerleri için– en iyi performansı vermiştir.

Elde edilen MI değerlerine göre, organik IKA katkısı olan Sasobit®, %3 ve üzeri içeriklerde önemli bir iyileşme sağlamıştır. %3 Rediset® WMX IKA katkısı düşük frekanslarda en yüksek MI değerini vermiştir. Bunlara ek olarak, ağır trafik koşullarında (düşük frekans) ve yüksek sıcaklıklarda (60°C üzeri) Advera® WMA katkısının %5 oranında kullanımı daha uygundur.

IKA katkıları kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlarda, tasarım bitümü olan optimum bitüm içeriği saf bitüm ile hazırlanan karışımlara kıyasla daha düşük orandadır. Bu durum IKA katkıların sağladığı düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı ile birlikte değerlendirildiğinde, düşük bitüm içeriği IKA katkıları daha cazibeli hale getirmiştir. Buna ek olarak, uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyleri, IKA katkı içeren asfalt betonu örneklerini stabilite açısından olumlu yönde etkilemiştir. Ayrıca, katkıların deformasyon özelliklerini yansıtan akma deneyi sonuçları %3'ten fazla organik ve kimyasal IKA katkı eklenmesinin akma özelliklerini olumsuz etkilediğini, diğer katkıların ise tüm içeriklerde şartname sınırları içinde (2–4 mm) kaldığını göstermiştir.

AASHTO T 283 Modifiye Lottman deneyi ile suya karşı duyarlılık analizleri doğal zeolit içeren karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin saf bitüm içeren karışımlara ve özellikle sentetik zeolit ile hazırlanan karışımlara göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Sentetik zeolit diğer katkıları arasında en fazla suya duyarlılık gösteren katkı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, suya bağlı bozulma analizinin özellikle IKA katkı içeren karışımlar için gerekliliğini ortaya koymuştur.

IKA katkı cinsleri ile hazırlanan bitümlü karışımlarla BSK'ların üzerinde ülkemiz koşullarında yapılan fayda–maliyet analizleri bu katkıların gerek az enerji tüketimi, gerekse karışımlarda daha az miktardaki bitümlü bağlayıcı kullanımı ve buna bağlı olarak çevresel zararları en aza indirmesi bakımından kullanılabilirliğini ön plana çıkarmıştır.

Çalışma kapsamında, farklı IKA katkıları içeren bitümlü karışımlar için daha ileri performans analizlerinin yapılması önerilmektedir. Bu analizler kapsamında, kalıcı deformasyona karşı direncin tespiti için Hamburg tekerlek izi (Hamburg wheel tracking device test) ve yorulma çatlaklarına karşı direnç için yorulma sertlik deneylerinin uygulanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abson, G. ve Burton, C. (1966). Investigation of failures in bituminous surfacing. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 35, 22-35.
- Akiseti, K. (2008). *Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures*. Yüksek Lisans Tezi, Clemson Üniversitesi.
- Asphalt Institute. (1996). *Asphalt insitute manual series for asphalt concrete and other hot mix type*. Lexington: Asphalt Institute Yayınları.
- ASTM D 4402-06. (2006). *Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer*. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials Yayınları.
- Barthel, W. ve Von Devivere, M. (2003). Warm asphalt mixes by adding aspha-min, a synthetic zeolite. *Proceedings, 48th Annual Convention, National Asphalt Pavement Association*, San Diego.
- Bhusal, S. (2008). *A laboratory study of warm mix asphalt for moisture damage potential and performances issues*. Yüksek Lisans Tezi, Oklahoma Devlet Üniversitesi.
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., ve DeVol, J. (2012). *Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington State*. Washington: WSDOT Yayınları.
- Brown, S.F. (1980). *An introduction to the analytical design of bituminous pavements*. Nottingham: Nottingham Üniversitesi Yayınları.
- Brown, S.F. (2001). Practical test procedures for mechanical properties of bituminous materials. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 111, 289-297.

- Bueche, N. (2009). *Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy. Emissions and Performance Young Researchers Seminar (YRS)*. Torino: LAVOC Yayınları.
- Button, J.W., Estakhri, C. ve Wimsatt, A. (2007). *A synthesis of warm-mix asphalt*. Teksas: FHA Yayınları.
- Butz, T., Rahimian, I. ve Hildebrand, G. (2001). Modification of road bitumen with the Fischer-Tropsch paraffin Sasobit. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology, 1* (2), 70-86.
- Chevron, J. (1977). *Bitumuls mix manual*. San Ramon: Chevron USA A.Ş Yayınları.
- Chowdhury, A. ve Button, W.J. (2008). *A review of warm mix asphalt*. Teksas: Teksas A&M Üniversitesi Yayınları.
- Csanyi, L.H. (1956). Foamed asphalt in bituminous paving mixes. *Highway Research Board Bulletin, 10* (160), 108-122.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., ve diğer. (2008). *Warm-mix asphalt: European practice*. Alexandria: FHWA Yayınları.
- Daniel, J. S. (2006). *Cold weather paving*. Wilmington: Warm Mix Asphalt Technology Yayınları.
- Fromm, J.M. (1974). The mechanism of asphalt stripping from aggregate surfaces. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 43*, 191-219.
- Gonzales, O., Munoz, M. E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F. J. ve Partal, P. (2004). Rheology and stability of bitumen/EVA blends. *European Polymer Journal, 40* (10), 2365-2372.

- Gürü, M. (2004). Improvement of adhesion of bitumen-aggregate coatings by additives. *Journal of Cellulose Chemistry and Technology*, 38 (2), 129-140.
- Gürü, M., Tekeli, S., Çubuk, M. K. ve Çubuk, M. (2005). Recycling of scrap vehicle tyre as elastic surface material. *The First Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering Journal*, 1 (1), 39-44.
- Gzanski, J.C. (1970). Factor efecting adhesion of asphalts to stone. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 39, 571-605.
- Haichert, R., Foth, M., Guenther, D. ve Berthelot, C.F. (2011). *Case study evaluation of the sustainability of recycled aggregate road structure*. Washington, D.C.: TRB Yayınları.
- Hurley, G. C. ve Prowell, B. D. (2005). *Evaluation of Aspha-Min zeolite for use in warm-mix asphalt*. Auburn: Auburn Üniversitesi Yayınları.
- Isaccson, U., Vinson, T.S. ve Zeng, H. (1997). The influence of materials factors on the low temperature cracking of asphalt paving mixtures. *Proceedings of the 5th International Rilem Symposium*, Fransa.
- Jenkins, K.J., de Groot, J.L.A., van de Ven, M.F.C. ve Molenaar, A.A.A. (1999). Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. *7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA)*, Victoria Falls, Güney Afrika.
- Jin, H., Gao, G., Y., Zhang, Y., Zhang, Sun, K. ve Fan, Y. (2002). Improved properties of polystyrene-modified asphalt through dynamic vulcanization. *Journal of Polymer Testing*, 21 (6), 633-640.
- Jones, R.D. (1999). Understanding how the origin and composition of paving grade asphalt cement affects their performance, *SHRP Technical Memorandum*, 4, 1258-1276.

- Koenders, B.G., Stoker, D.A., Bowen, C., de Groot, P., Larsen, O., Hardy, D. ve diğ er. (2000). Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barselona, İspanya.
- Kuennen, T. (2004). *Warm mixes are a hot topic*. Illinois: James Informational Media Yayınları.
- Larsen, O.R. (2001). *Warm asphalt mix with foam: WAM-Foam*. Norveç: Thèmes Techniques Yayınları.
- 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*, Viyana, Avusturya.
- Maccarrone, S., Holleran, G. ve Ky, A. (1994). Cold asphalt systems as an alternative to hot mix. *Proceedings, 9th International AAPA Conference*, Queensland, Australya.
- Majidzadeh, K. (1968). The effect of water on bitumen aggregate mixtures. *Journal of Highway Research Board*, 98, 125-132.
- Mallick, R., Kandhal, P. ve Bradbury, R. (2008). Using warm mix asphalt technology to incorporate high percentage reclaimed asphalt pavement (RAP) material in asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2051, 71-79.
- McKenzie, P. (2006). Taking a closer look at warm mix. *Journal of Better Roads*, 76 (6), 64-69.
- Mogawer, W. S., Austerman, A. J., Engstrom, B., ve Bonaquist, R. (2009). *Incorporating high percentages of recycled asphalt pavement (RAP) and warm*

mix asphalt (WMA) technology into thin hot mix asphalt overlays to be utilized as a pavement preservation strategy. Washington, D.C.: TRB Yayınları.

Moore W. (2007). *Warm-mix asphalt (WMA) potentially can provide important benefits for paving contractors, reduce fuel costs and diminish green-house gases.* 27 Haziran 2013, <http://www.constructionequipment.com/warm-mix-asphalt-wma-potentially-can-provide-important-benefits-for-paving-contractors-reduce-fuel-costs>.

Orhan, F. (2012). *Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları.* Ankara: KGM Basım Evi.

Önal, A.M. ve Kahramangil, M. (1993). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı.* Ankara: KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Basım Evi.

Pell, P.S. (1988). *Bituminous pavements, materials, design and evaluation.* Nottingham: Nottingham Üniversitesi Yayınları.

Plancher, H., Green, E.L. ve Peterson, J.C. (1976). Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 45, 1-24.

Prowell, B. ve Hurley, G. (2007). *Warm-mix asphalt: Best practices.* Lanham: NAPA Yayınları.

Rice, J.M. (1959). *Relationship of aggregate characteristics to the effect of water on bituminous paving mixtures in ASTM.* Pennsylvania: American Society for Testing and Materials Yayınları.

Romier, A., Audeon, M., Jac, D., Martineau, Y. ve Olard, F. (2007). Low-Energy Asphalt with the performance of hot mix asphalt. *Journal of Transportation Research Board*, 1962, 101-112.

- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. ve Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- 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.
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y. ve Zhang, Y. (2011). Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 25 (2), 886-891.
- SHRP A-415. (1994). *Accelerated performance related tests for asphalt aggregate mixes and their use in mix design and analysis system*. Strategic Highway Research Program.
- Stock, A.F. ve Arand, W. (1993). Low temperature cracking in polymer modified binders. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologist*, 62, 23-53.
- Stuart, K.D. (1990). *Moisture damage in asphalt mixtures: A state of art report*. Mclean: Turner-Fairbank Yayınları.
- Şengöz, B. (2003). *Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına ve suya duyarlılığına etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Terrel, L.R. ve Swailmi, A.S. (1987). *Water sensitivity of asphalt aggregate mixes*. Washington D.C.: SHRP Yayınları.
- Thelen, A. (1958). *Surface energy and adhesion properties in asphalt aggregate systems*. Philadelphia: The Franklin Institute Yayınları.
- Topal, A. (2001). *Fine aggregate angularity in Turkey in bituminous mixtures*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

- Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Ankara: Atlas Basım Evi.
- Uluçaylı, M. (1998). The identification of failures in asphaltic concrete pavements, *Cento Seminar on the Maintenance and Improvement of Highways*, İslamabad.
- Vaitkus, A., Cygas, A., Laurinavicius, A. ve Perveneckas, Z. (2009a). Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4 (2), 80-86.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V. ve Ziliut, L. (2009b). *The research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures*. Vilnius: Vilnius Gediminas Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Verstraeten, J. (1994). Bituminous materials with a high resistance to flow rutting. *PIARC Technical Congress*, Belçika.
- Von Devivere, M., Barthel, W. ve Marchand, J.P. (2004). Warm asphalt mixes by adding Aspha-Min, a synthetic zeolite. *22nd PIARC World Road Congress*, Durban, Güney Afrika.
- Voyutsky, S. (1978). *Collid Chemistry*. Moskova: MIR Yayınları.
- Zaumanis, M. (2010). *Warm mix asphalt investigation*. Doktora Tezi, Riga Teknik Üniversitesi, Lyngby, Danimarka.
- Zeng, H. (1995). *On the low temperature cracking of asphalt pavements*. İsveç: Kraliyet Teknoloji Enstitüsü.
- Zettler, R. (2006). Warm mix stands up to its trials. *Jornal of Better Roads*, 76 (2), 16-21.

Zhang J. (2010). *Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance*. ABD: UNL Basım Evi.