

Özel Öğütölmüş Lastik Atığı İçeren Asfalt Betonunun
Performans Özelliklerinin Belirlenmesi

Arzu Er

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı

Eylöl-2011

Determination of The Asphalt Concrete Performance Containing
Specially-Treated Waste Tire

Arzu ER

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

Eylül-2011

Özel Öğütölmüş Lastik Atığı İçeren Asfalt Betonunun
Performans Özelliklerinin Belirlenmesi

Arzu Er

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca
İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Murat Karacasu

Eylöl-2011

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Arzu Er'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Özel Öğütülmüş Lastik Atığı İçeren Asfalt Betonunun Performans Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Murat Karacasu

İkinci Danışman : -----

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd.Doç.Dr.Murat Karacasu

Üye : Doç.Dr.Yetiş Şazi Murat

Üye : Yrd.Doç.Dr.Şafak Bilgiç

Üye : Yrd.Doç.Dr.Polat Yalınız

Üye : Yrd.Doç.Dr.Volkan Okur

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yol inşaatlarında soğuk, ılık, sıcak karışım ve yüzey kaplama türleriyle yıllardır dünyada olduğu gibi Türkiye’de de çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yüzden yollardan, üzerine gelen trafik yükleri ve çevresel şartlar etkisi altında belirli bir performansta ve uzun ömürlü olması beklenmektedir. Performans artırmanın ön önemli yollarından biri de asfalt veya karışım içerisine katkı kullanmaktır. Günümüzde bu amaçla çok çeşitli katkılar kullanılmaktadır. Hem günümüz teknolojisi ve yaşam standartlarıyla birlikte sürekli oluşan atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de kaplama performansını geliştirmek amacıyla uzun yıllardır, atık malzemeleri asfalta katkı olarak kullanmak sıkça başvurulan bir yöntem olmuştur.

Ömrünü tamamlamış ve hurdaya çıkmış otomobil lastiği, miktarının çokluğu, depolama zorluğu ve çevreye verdiği zarar nedeniyle asfalt kaplama için uygun bir katkı malzemesidir. Asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerine olan iyileştirmeleri de şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalarla ortaya konmuştur. Literatürde lastiğin asfaltta katkı olarak kullanımı, farklı boyutlarda ve oranlarda lastiğin, ıslak ve kuru karışıma ilave edilmesi ve laboratuvar koşullarında performansının değerlendirilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada atık otomobil lastiği farklı bir yöntemle, özel olarak yüksek basınç ve sürtünme etkisiyle öğütülmüş, bu sayede yüzey alanı arttırılmış ve CMR-300 adı verilen bu toz lastik ıslak karışıma ilave edilerek performansı izlenmiştir. Deneyler normal asfalt betonu, %10 ve % 15 CMR-300 içeren asfalt ile üretilmiş asfalt betonu için gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, CRM-300 katkı malzemesi gerek asfalt gerekse karışım içerisinde homojen bir dağılım sağlamış ve asfalt betonunun bütün performans özelliklerinde iyileşmeler göstermiştir. Ancak en önemli özelliği bünyesinde biriktirdiği ısı enerjisi olmuştur. Bu özelliği ile asfaltın özellikle soğuk iklimli bölgelerde yol üzerindeki don etkileri azalacak ve düşük sıcaklıklarda asfalt betonu dökümü sağlayabilecektir. CMR-300 don etkilerini azaltması yönünden soğuk iklimli bölgelerde meydana gelebilecek muhtemel kazaların azalması ve düşük sıcaklıklarda döküm yapılabilmesi yönünden de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlaması bakımından ülkemiz ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Atık, toz lastik, asfalt betonu, sünme, kalıcı deformasyon.

SUMMARY

It has been widely used with various surface coating methods in cold, warm and hot mixture and surface coating procedures in road construction field in Turkey as in the World for a long time.

What is expected from roads is to meet requirements for traffic loads endured and to have a long lasting feature with a specific performance under the effects of environmental conditions. One of the methods for increasing performance is to use additives in bitumen or mixture. Nowadays, an extensive variety of additives are used for that purpose. Those additives are obtained from industrial production or wide variety of debris. Using debris materials in asphalt as additive has become a frequently applied method for a long time, in order both to increase coating performance and to put debris to good use.

Automobile tires which are scrapped and dropped out of use are suitable additive materials for coating asphalt since they are in extensive quantity and difficult to store and harmful to environment. Improvements have been put forward by the studies performed up to now, in terms of contribution to physical and rheological features of bitumen.

In this study, scrapped automobile tires have been treated with high pressure and friction effect and added into bitumen, and the modified bitumen, named as CMR-300 and SMR-400, is obtained. Experiments are performed separately on a normal asphalt concrete and on the asphalt concretes having CMR-300 and SMR-400. Generally, the asphalt concrete with the additive material of CRM-300 and SMR-400 indicates improvements in all performance features.

It is aimed that all results of the experiments which are performed on a normal asphalt concrete and an asphalt concrete with CMR-300 and SMR-400 are presented in this study.

Keywords: Waste, ground rubber, asphalt concrete, creep, permanent deformation

TEŐEKKÖR

Doktora eğitimimin her aşamasında bana danıőmanlık yapan, yardımlarını esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. Murat Karacasu'ya sonsuz teőekkÖrlerimi sunarım. Laboratuvar ęalıőmalarım sırasında emeği geçen, bana yardımcı olan İnşaat Teknikeri EyÖp Ertaő'a da teőekkÖrü bir borę bilirim.

Ayrıca ęalıőmalarım boyunca beni sabırla destekleyen, maddi manevi her zaman yanımda olan eőime ve ęocuklarıma, beni bugÖnlere getiren, eğitimimin ve yaőamımın her zorluğunda, her aşamasında benimle olan aileme ęok teőekkÖr ederim.

Arzu ER
EylÖl 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜRLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxiii
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
2. KARAYOLU ÜST YAPISI.....	22
2.1. Esnek Üstyapı	22
2.1.1. Alt temel tabakası	23
2.1.2. Temel tabakası	25
2.1.3. Alttemel ve temel tabakalarının özellikleri	27
2.1.4. Kaplama tabakası	32
2.1.4.1. Sathi (yüzeysel) kaplama	33
2.1.4.2. Asfalt betonu kaplama.....	37
2.2. Rijit Üstyapı.....	45
2.2.1. Kaplama tabakası	47
2.2.2. Zemin ve alttemel tabakaları.....	48
2.2.3. Rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajları	48
3. KARAYOLU ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER.....	50
3.1. Agregalar.....	50
3.1.1. Agregaların sınıflandırılması	50
3.1.1.1. Mineralojik sınıflandırma.....	50
3.1.1.2. Boyut sınıflandırması	51

İÇİNDEKİLER (devamı)

3.1.1.3. Gradasyon sınıflandırması.....	51
3.1.1.4. Biçim sınıflandırması	52
3.1.1.5. Yüzey yapısı sınıflandırması.....	54
3.1.1.6. Porozite sınıflandırması.....	54
3.1.1.7. Yüzey alanı ve boşluk sınıflandırması	56
3.1.1.8. Özgül ağırlık sınıflandırması.....	58
3.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri.....	61
3.1.2.1. Stabilite.....	61
3.1.2.2. Durabilite.....	62
3.1.2.3. Adezyon	62
3.1.3. Agregalarda aranılan özellikler	63
3.2. Bitümlü Bağlayıcılar.....	66
3.2.1. Bitümlü bağlayıcıların en eski kullanımı	67
3.2.2. Asfalt tanımı ve sınıflandırılması.....	67
3.2.2.1. Asfalt çimentosu.....	69
3.2.2.2. Sıvı asfaltlar.....	72
3.2.3. Modifiye bitümler	73
3.3. CRM-300 ve SMR-400	78
3.3.1. Modifiye asfaltın hazırlanması ve depolanması.....	82
3.3.2. Modifiye asfaltın kullanılması	82
3.3.3. Modifiye asfalt betonunun taşınması ve serilmesi.....	82
3.3.4. Modifiye asfaltın özellikleri.....	82
3.3.5. Modifiye asfalt tipinin seçimi	84
3.3.6. Modifikatör CRM-300 ve SMR-400 ün diğer modifikatörlere göre avantajları.....	84
4. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN DENEYLER	86
4.1. Agregalara Uygulanan Deneyler	86
4.1.1. Elek analizi.....	86

İÇİNDEKİLER (devamı)

4.1.1.1. Kullanılan aletler	86
4.1.1.2. Deneyin yapılışı.....	87
4.1.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	88
4.1.2. Los Angeles (Aşınmaya dayanıklılık ve aşınma kaybı deneyi).....	90
4.1.2.1. Kullanılan aletler	90
4.1.2.2. Deneyin yapılışı.....	91
4.1.2.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	93
4.1.3. İri Agrega için özgül ağırlık ve su emme deneyi	94
4.1.3.1. Kullanılan aletler	94
4.1.3.2. Deneyin yapılışı.....	95
4.1.3.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	95
4.1.4. İnce agregada için özgül ağırlık ve su emme deneyi	96
4.1.4.1. Kullanılan aletler	96
4.1.4.2. Deneyin yapılışı.....	97
4.1.4.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	98
4.1.5. Filler için özgül ağırlık ve su emme deneyi	99
4.1.6. Agrega birim ağırlık deneyi	100
4.1.6.1. Kullanılan aletler	100
4.1.6.2. Deneyin yapılışı.....	100
4.1.6.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	102
4.1.7. Yassılık indeksi tayini	103
4.1.7.1. Kullanılan aletler	103
4.1.7.2. Deneyin yapılışı.....	104
4.1.7.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	105
4.1.8. Agregada organik madde tayini	106
4.1.8.1. Kullanılan aletler	106
4.1.8.2. Deneyin yapılışı.....	106
4.1.8.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	107
4.1.9. Donmaya ve çözünmeye karşı direnç	107

İÇİNDEKİLER (devamı)

4.1.9.1. Kullanılan aletler	108
4.1.9.2. Deneyin yapılışı.....	109
4.1.9.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	110
4.1.10. Agrega deneyleri toplu sonuçları	111
4.2. Bitüme uygulanan deneyler	110
4.2.1. Yumuşama noktası deneyi	111
4.2.1.1. Kullanılan aletler	111
4.2.1.2. Deneyin yapılışı.....	113
4.2.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	114
4.2.2. Penetrasyon deneyi	115
4.2.2.1. Kullanılan aletler	115
4.2.2.2. Deneyin yapılışı.....	117
4.2.2.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	118
4.2.3. Düktilite deneyi.....	120
4.2.3.1. Kullanılan aletler	121
4.2.3.2. Deneyin yapılışı.....	122
4.2.3.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	125
4.2.4. Elastik geri dönme deneyi.....	125
4.2.5. Parlama noktası deneyi	126
4.2.5.1. Kullanılan aletler	126
4.2.5.2. Deneyin yapılışı.....	128
4.2.5.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	129
4.2.6. Isıtma kaybı deneyi	129
4.2.6.1. Kullanılan aletler	129
4.2.6.2. Deneyin yapılışı.....	131
4.2.6.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	132
4.2.7. Özgül ağırlık deneyi.....	133
4.2.7.1. Kullanılan aletler	133
4.2.7.2. Deneyin yapılışı	134

İÇİNDEKİLER (devamı)

4.2.7.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	134
4.2.8. Bitüm deneyleri toplu sonuçları	136
4.3. Katkı Maddesine Uygulanan Deneyler	138
4.4. Karışıma Uygulanan Deneyler	139
4.4.1. Marshall deneyi	140
4.4.1.1. Kullanılan aletler	140
4.4.1.2. Deneyin yapılışı	143
4.4.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması	149
4.4.1.4. Kontrol numunelerine uygulanan Marshall deney sonuçları	151
4.4.1.5. CRM-300 katkılı numunelere uygulanan Marshall deney sonuçları	155
4.4.1.6. SMR-400 katkılı numunelere uygulanan Marshall deney sonuçları	159
4.4.1.7. Marshall deneyi toplu sonuçları	163
4.4.2. Isı kaybı deneyi	163
4.4.3. Elastik geri dönme deneyi	165
4.4.4. Sünme deneyleri	166
4.4.4.1. Kullanılan aletler	166
4.4.4.2. UTS014 Test Cihazı	168
4.4.4.3. Dinamik sünme deney sonuçları	174
4.4.4.4. Statik sünme deney sonuçları	180
4.5. KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) ve Arazi Deney Sonuçları	186
5. EKONOMİK KARŞILAŞTIRMA	193
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	197
KAYNAKLAR DİZİNİ	205
ÖZGEÇMİŞ	214

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 2004-2009 yılları arasında ABD’de asfalt tüketim miktarı	3
1.2 2004-2009 yılları arasında Avrupa’da asfalt tüketim miktarı.....	3
1.3 2004-2009 yılları arasında Türkiye’de asfalt tüketim miktarı	4
2.1. Esnek üstyapı enkesiti	23
2.2 Esnek üst yapı tabakaları.....	26
2.3 Üstyapı tabakalarında araç lastiğinden gelen yükün dağılımı.....	33
2.4 Rijit üstyapı enkesiti.....	46
2.5 Rijit üst yapı tabakaları	47
3.1 Agregada gradasyon tipleri	52
3.2 Agregada 2 boyut biçim sınıflandırılması	53
3.3 Agregada 3 boyut biçim sınıflandırılması.....	53
3.4 Agregada yüzey yapısı sınıflandırılması.....	54
3.5 Agregada porozite sınıflandırılması.....	55
3.6 Dane çapı-yüzey alanı ve dane çapı-boşluk oranı ilişkisi	56
3.7 Agregada danesindeki hacim ve ağırlık ilişkisi	58
3.8 İnce malzeme özgül ağırlık testi (balon metodu).....	60
3.9 Kaba malzemenin özgül ağırlık testi.....	60
3.10 Asfalt sınıflandırılması.....	70
3.11 Yüksek basınç altında özel olarak öğütülmüş otomobil lastiği.....	79
3.12 Asfalt plenti.....	80
3.13 CRM-300 katkı malzemesinin mikroskopik görüntüsü	81
3.14 CRM-300 tane boyutu.....	81
4.1 Elekler	87
4.2 Teraziler.....	87
4.3 Etüv	88
4.4 Aşınma tip-2 granülometre eğrisi.....	90
4.5 Bilyeli tambur	91
4.6 Kafes örgülü sepet (a) ve özgül ağırlık sehpa (b).....	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

4.7	İnce agreganın özgül ağırlığının bulunması.....	98
4.8	Ölçü kabı.....	101
4.9	Numune şişlenmesi	101
4.10	Yassılık indeksi şablonu.....	104
4.11	Agregalarda organik madde	107
4.12	Sodyum sülfat (Na_2SO_4)	108
4.13	Yumuşama noktası deney düzeneği	112
4.14	Halkalar (a) ve beher (b)	113
4.15	Yumuşama noktası deney sonucu	114
4.16	Penetrasyon cihazı (a) ve numune (b)	117
4.17	Su banyosu ve deney anı	117
4.18	Numune kalıpları (a) ve kalıplara numune dökümü (b).....	121
4.19	Dökülmüş numuneler	122
4.20	Düktilite cihazı	122
4.21	Düktilite deney aşamaları (a)	123
4.22	Düktilite deney aşamaları (b)	124
4.23	Düktilite deney aşamaları (c)	124
4.24	Düktilitenin şematik gösterimi	125
4.25	Parlama noktası deney düzeneği	127
4.26	Termometre ile ısı ölçümü	127
4.27	Numunenin parlaması	128
4.28	Etüv	130
4.29	Bitümle dolu numune kapları.....	130
4.30	Tartılan numune	131
4.31	Etüv içerisindeki numuneler	131
4.32	Piknometre	133
4.33	CRM-300'ün mikroskopik görüntüsü (*1000)	138
4.34	Mikser	141
4.35	Numune kalıpları.....	142

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

4.36	Kriko	142
4.37	Digital tartı	143
4.38	Sıcak su banyosu	143
4.39	Gradasyonu ayarlanmış agrega numuneleri	144
4.40	Agrega karışımına bitüm eklenmesi.....	144
4.41	Karışımın mikserde karıştırılması	145
4.42	Numune kalıbının tabanına konulan yağlı kağıt	145
4.43	Karışımın numune kalıbına konulması	146
4.44	Karışımın şişlenmesi	146
4.45	Karışımın Marshall tokmağında sıkıştırılması	147
4.46	Numuneler.....	147
4.47	Oda sıcaklığında numuneler.....	148
4.48	Sıcak su banyosunda numuneler	148
4.49	Marshall test cihazı	149
4.50	Numunenin stabilite ve akma değerleri	149
4.51	Kontrol numuneleri bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği	151
4.52	Kontrol numuneleri bitüm oranı- marshall dayanımı grafiği	152
4.53	Kontrol numuneleri bitüm oranı- boşluk oranı grafiği.....	152
4.54	Kontrol numuneleri bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı grafiği	153
4.55	Kontrol numuneleri bitüm oranı- akma grafiği.....	154
4.56	CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği	155
4.57	CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- marshall dayanımı grafiği	156
4.58	CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- boşluk oranı grafiği.....	156
4.59	CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı-bitümle dolu boşluk oran grafiği	157
4.60	CRM-300 katkılı numunelerin akma –bitüm oranı değişimi	158
4.61	SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği	159
4.62	SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- marshall dayanımı grafiği	160
4.63	SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- boşluk oranı grafiği	160

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

4.64	SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı-bitümle dolu boşluk oranı grafiği	161
4.65	SMR-400 katkılı numunelerin akma –bitüm oranı grafiği.....	162
4.66	Isı kaybı değişimi(numune içi)	164
4.67	Isı kaybı değişimi(numune yüzeyi)	164
4.68	Numunelerin elastik geri dönme deney sonuçları	165
4.69	Elastik geri dönüş değerleri.....	166
4.70	İklimlendirme kabini.....	166
4.71	Yükleme seti.....	167
4.72	Veri işlemci, bilgisayar	167
4.73	Kompresör.....	168
4.74	Sünme deney aleti içerisinde test numunesi.....	170
4.75	UTS cihazı bilgisayar programı “general” sekmesi	171
4.76	UTS cihazı bilgisayar programı “set up parameters” sekmesi.....	172
4.77	UTS cihazı bilgisayar programı “Test results data” sekmesi.....	173
4.78	160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (dinamik) sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği	174
4.79	160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (dinamik) birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği	174
4.80	120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (dinamik) sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği	175
4.81	120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (dinamik) birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği	175
4.82	CRM-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (dinamik) sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği	176
4.83	CMR-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (dinamik) birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği.....	176
4.84	SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (dinamik) sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği	177
4.85	SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (dinamik) birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği.....	177

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

4.86	Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan dinamik sünme deneyi sonucu sünme rijitliği-vuruş sayısı karşılaştırma grafiği	179
4.87	Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan dinamik sünme deneyi sonucu birikimli deformasyon-vuruş sayısı karşılaştırma grafiği	179
4.88	160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (statik) sünme rijitliği-zaman grafiği	180
4.89	160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (statik) birikimli deformasyon-zaman grafiği	180
4.90	120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (statik) sünme rijitliği-zaman grafiği	181
4.91	120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin (statik) birikimli deformasyon-zaman grafiği	181
4.92	CRM-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (statik) sünme rijitliği-zaman grafiği	182
4.93	CRM-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (statik) birikimli deformasyon zaman grafiği	182
4.94	SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (statik) sünme rijitliği-zaman grafiği	183
4.95	SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de (statik) birikimli deformasyon-zaman grafiği	183
4.96	Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan statik sünme deneyi sonucu sünme rijitliği-zaman karşılaştırma grafiği	185
4.97	Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan statik sünme deneyi sonucu birikimli deformasyon-zaman karşılaştırma grafiği	185
4.98	Katkısız karışım arazi sonuçlarına göre T.İ.O.	189
4.99	CRM-300 katkılı karışım arazi sonuçlarına göre T.İ.O.	189
4.100	CRM-300 katkılı ve katkısız karışımlarda T.İ.O.	190
4.101	Vuruş Sayısı-deformasyon grafiği (+20°C)	193
5.1	Esnek üstyapının şematik gösterimi	195
6.1	Elastik geri dönme	198

6.2	Elektron mikroskopunda (a) sert plastik (x1000), (b) granül lastik (x1000)	199
6.3	Elektron mikroskopunda (a) çubuk lastik (x1000), (b) toz lastik (x1000).....	199
6.4	Elektron mikroskopunda CRM(x1000)	200
6.5	CRM arazi uygulaması	202

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Alttemel Malzemesi Gradasyon Limitleri (KTŞ, 2006)	24
2.2 Alttemel Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (KTŞ, 2006)	25
2.3 Temel Tabakasında Kullanılacak Kaba Agregada Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (KTŞ, 2006)	26
2.4 Temel Tabakasında Kullanılacak İnce Agregada Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (KTŞ, 2006)	27
2.5 Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri (KTŞ, 2006)	27
2.6 Temel ve alttemel tabakalarında kullanılan agrega gradasyonları ..	29
2.7 Alttemel ve temel tabakalarının özellikleri ..	31
2.8 Tek Kat Sathi Kaplama Gradasyonları ..	35
2.9 Tek Kat Sathi Kaplamada Kullanılan Agrega Özellikleri ..	35
2.10 Çift Kat Sathi Kaplama Gradasyonları ..	36
2.11 Çift Kat Sathi Kaplamada Kullanılan Agrega Özellikleri ..	36
2.12 Binder Tabakası İçin Gradasyon Limitleri ..	37
2.13 Aşınma Tabakası İçin Gradasyon Limitleri ..	37
2.14 Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri ..	38
2.15 İnce Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri ..	38
2.16 Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri ..	39
2.17 Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarında Aranılan Özellikler ..	41
3.1 Yüzey Alanı Faktörü ..	57
3.2 Asfalt uygulamalarında agrega özellikleri ..	64
3.3 Asfalt kaplama tabakalarının agrega özellikleri ..	65
3.4 Bitümün kimyasal bileşenleri ..	66

ÇİZELGELER DİZİNİ (devamı)

3.5	Asfaltın kimyasal bileşenleri.....	69
3.6	Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri	71
3.7	Sıvı asfaltların sınıflandırılması	72
3.8	Modifiye bitümler için katkı maddeleri	74
3.9	Bitüm Modifikasyon Tipleri	76
3.10	Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması.....	77
3.11	Yol Yapımında Kullanılan Kaplama Sınıfı Asfaltların Özellikleri	78
3.12	CRM-300 SMR-400 Kullanım Oranları	80
3.13	Modifiye edilmiş asfalt ürünü (CRM-300)	83
3.14	Modifiye edilmiş asfalt ürünü (SMR-400).....	83
4.1	Aşınma Tip-2 için gradasyon limitleri	89
4.2	Numune tipleri ve miktarları.....	92
4.3	Aşınma deneyi numune tiplerine göre kullanılacak bilye özellikleri	92
4.4	Los Angeles deney sonucu.....	93
4.5	İri agrega özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.....	96
4.6	İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	99
4.7	Filler özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	99
4.8	Sıkışık birim hacim ağırlık deney sonucu.....	102
4.9	Gevşek birim hacim ağırlık deney sonucu.....	103
4.10	Deneye alınacak minimum malzeme miktarı ve boyutları	105
4.11	Yassılık indeksi deney sonucu	106
4.12	Agregalarda organik madde etkisi	107
4.13	Don kaybı oranı deney sonucu.....	110
4.14	Agrega deneyleri toplu sonuçları	111
4.15	Isıtma kaybı öncesi yumuşama noktası deney sonucu.....	114

ÇİZELGELER DİZİNİ (devamı)

4.16	Isıtma kaybı sonrası yumuşama noktası deney sonucu.....	114
4.17	Yol Üst Yapılarında Kullanılan Asfalt Çimentolarının Özellikleri	116
4.18	Ölçümler arasında olabilecek en büyük fark.....	118
4.19	Isıtma kaybı deneyi öncesi penetrasyon değeri.....	119
4.20	Isıtma kaybı deneyi sonrası penetrasyon değeri	119
4.21	Penetrasyon ve viskozite sınıfları arasındaki ilişki	120
4.22	Bitüm Penetrasyon ve Viskozite Değerleri Arasındaki İlişki	120
4.23	Isıtma kaybı öncesi ve sonrası düktilite değerleri.....	125
4.24	Isıtma kaybı öncesi elastik geri dönme deneyi sonuçları.....	126
4.25	Isıtma kaybı sonrası elastik geri dönme deneyi sonuçları.....	126
4.26	Numunenin parlama noktası	129
4.27	Isıtma kaybı deneyi sonuçları	132
4.28	Isıtma kaybı duyarlılık sınırları.....	132
4.29	Özgül ağırlık deney sonuçları	135
4.30	Isıtma kaybı öncesi bitüm deneyleri toplu sonuçları	136
4.31	Isıtma kaybı deneyi öncesi ve sonrası bitüm deneyleri toplu sonuçları.....	137
4.32	CRM-300 katkı maddesi elementer analiz sonuçları (a).....	139
4.33	CRM-300 katkı maddesi elementer analiz sonuçları (b)	139
4.34	Aşınma tabakası asfalt betonu dizayn kriterleri.....	150
4.35	Kontrol numuneleri deney sonuçları.....	151
4.36	Kontrol numuneleri için ortalama bitüm oranı	153
4.37	Kontrol numuneleri için en uygun asfalt oranına göre deney sonuçları	154
4.38	CRM-300 katkılı numunelerin deney sonuçları.....	155
4.39	CRM-300 katkılı numuneler için ortalama bitüm oranı.....	157

ÇİZELGELER DİZİNİ (devamı)

4.40	CRM-300 katkılı numuneler için en uygun asfalt oranına göre deney sonuçları	158
4.41	SMR-400 katkılı numunelerin deney sonuçları	159
4.42	SMR-400 katkılı numuneler için ortalama bitüm oranı	161
4.43	SMR-400 katkılı numuneler için en uygun asfalt oranına göre deney sonuçları	162
4.44	Marsall deneyi toplu sonuçları	163
4.45	Modifiye bitüm deney raporu	186
4.46	Tokat-Turhal Devlet Yolu Lastiksiz Aşınma Karışımının TİO ve İÇM Deney Sonuçları	187
4.47	Tokat-Turhal Devlet Yolu CRM-300 Katkılı Aşınma Karışımının TİO Ve İÇM Deney Sonuçları	188
4.48	Katkısız numuneler için İÇM.....	190
4.49	CRM-300 katkılı numuneler için İÇM.....	190
4.50	Araziden alınan karot numuneleri sonuçları	191
5.1	Marshall testi sonucu optimum bitüm oranları	194
5.2	Bitüm fiyatı karşılaştırma.....	196

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar Açıklama

KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
DSR	Dynamic Shear Rheometer (dinamik kesme reometresi)
TFOT	İnce film halinde ısıtma kaybı
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test (dönel ince film halinde ısıtma kaybı)
BBR	Bending Beam Rheometer (kiriş eğme reometresi)
RV	Rotational Viscosity (Dönel viskozite)
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
YSA	Yapay sinir ağları
SBS	Styren-Butadien-Styren
CRM	Toz lastik modifiyeli
BSK	Bitümlü sıcak karışım
OBO	Optimum Bitüm Oranı
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
AASHTO	The American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
SG	Özgül ağırlık (Specific Gravity)
TİO	Tekerlek izinde oturma
İÇM	İndirek çekme mukavemeti

Simgeler Açıklama

γ	Yoğunluk
V	Hacim
W	Ağırlık
ε	Şekil değiştirme
σ	Gerilme

BÖLÜM 1

GİRİŞ ve AMAÇ

M.Ö. 3000 yıllarında tekerleğin icadıyla yollara olan ihtiyaç ortaya çıkmıştır. M.Ö. 2600 yıllarına kadar uzanan tarihi ile bilinen en eski yollardan olan İpek Yolu Çinlilerin ipek dokumacılığı ticareti için yapılmıştır. Türkiye’de de tarih öncesinden bu yana ortaya çıkan çeşitli medeniyetlerin yapmış olduğu çok çeşitli yollar bulunmaktadır. Milattan önce 2000 dolaylarında Asur ve Babillilerin Mezopotamya’da meydana getirdikleri yol ağları Türkiye’ye kadar uzanmıştır. Fırat boyunca uzayan bir yol yanında Musul’dan Urfa’ya ulaşan ve oradan Anadolu içerisine giden bir kol mevcuttur. Osmanlılar zamanında dünya ticaret merkezlerinin değişikliğe uğraması, yeni siyasi merkezlerin önem kazanmasına ve yol ağlarının bu isteklere uygun biçimde değişmesine sebep olmuştur. Osmanlı İmparatorluğu’nun yükseliş döneminde ihtiyaca cevap verebilecek bir yol ağı geliştirilmiş ve bu yol ağı uzun süre korunmuştur. Ancak, İmparatorluğun son dönemlerinde, o zamana kadar başarılı olan yarı askeri özellikteki Karayolları organizasyonu, yolları ihmal etmeye başlamış ve yollar bakımsız kalmıştır. Birinci Dünya Savaşı, arkasından İstiklal Harbi yıllarında karayollarına gereken önem verilememiş, büyük bir kısmı bakımsız kalmıştır. Osmanlı Devletinin yıkılmasından sonra kalan ulaşım damarları 13.885 kilometresi bozuk ve kaplama genişliği üç metre olan şose ile 4450 km toprak yol olmak üzere toplam 18.350 km yol olarak kalmıştır. Cumhuriyetin ilanından sonra çıkarılan kanunlarla yol yapımı için çalışmalara önem verilmiştir.

Uzun süren savaş döneminin getirdiği sıkıntılar, dünya ekonomik krizi ve II. Dünya Savaşından sonra, karayolu çalışmaları için yeni bir atılıma ihtiyaç duyulmuştur. Makineli çalışma dönemine denk gelen 1948 yılı karayollarının gelişmesi bakımından önemli bir yıldır. Türkiye’de karayolları tarihi 1948 öncesi ve sonrası olarak düşünülebilir. Önce tamamen insan gücüyle yapılan her şey 1948 yılından sonra makineyle yapılmaya başlanmıştır.

Yol inşaatında taşın farklı bir şekilde kullanımı ile ilgili olarak, İskoçyalı J.L. Mc Adam (1756–1836) yol yapım malzemesi olarak kırma taş kullanmış ve böylece ülkemizde de kullanılmakta olan Makadam tipi yol ortaya çıkmıştır. Bu yollarda üst

tabaka, kırma taşın bir silindir yardımı ile sıkıştırılması ve boşlukların taş tozu ile sudan oluşan hamurla doldurulması suretiyle inşa edilmiştir (İsfalt, 2010)

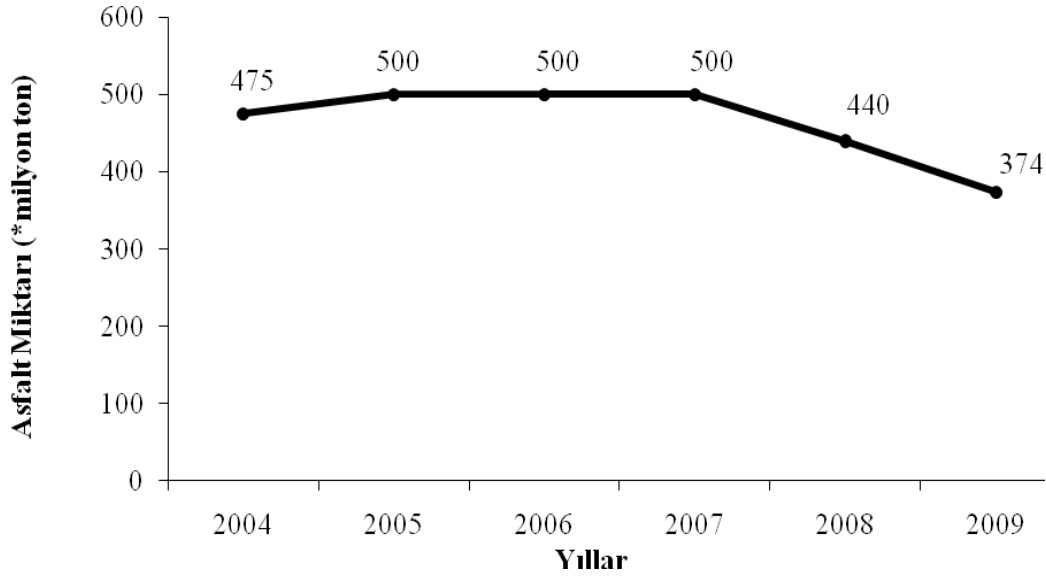
Motorsuz taşıtların tekerlek yüklerine karşı koymakta yeterli olan Makadam tipi kaplamalar, motorlu taşıtların özellikle bandaj etkileri karşısında yetersiz kalmış, yol inşasında yeni tabakaların ve özellikle kaplama tabakasında bir bağlayıcının kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bunun sonucu olarak taşıtlara daha uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlayan ve daha uzun ömürlü bitümlü kaplamalar ve çimento bağlayıcılı beton yollar kullanılmıştır.

Asfalt 5000 yıldır bilinen en eski inşaat malzemelerinden olup, geçirimsizliği sağlayan bir kaplama malzemesi veya harç olarak kullanılmakla birlikte asfaltlı yol malzemesi olarak kullanılması 100 yıl öncesine dayanmaktadır. O yıllarda da bağlayıcı özelliği için değil, araçların kaldırdığı tozu önlemek amacıyla kullanılmıştır (www.asfud.org.tr).

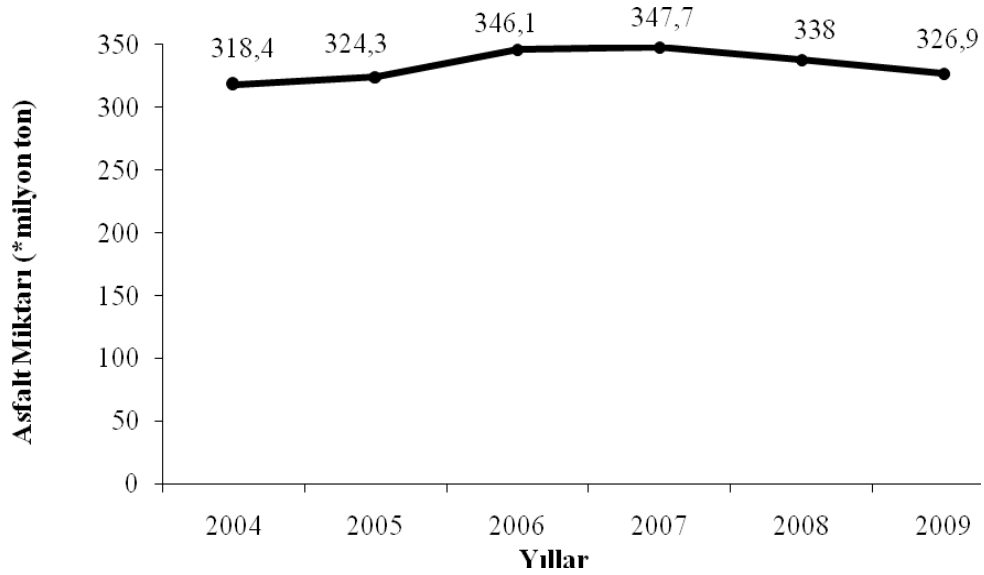
1900'lü yılların başlarında ham petrolden asfaltı rafine etmenin keşfedilmesi ve motorlu araç üretiminin artması yol yapımında asfalta olan ilgiyi arttırmıştır. Günümüzde kullanım amacı, trafik yükü ve çevre koşullarına göre değişik tipte asfalt kaplamalar yapılmaktadır (Tunç, 2007).

Türkiye'de ilk asfalt uygulamaları Osmanlı döneminde başlamış ve penetrasyon makadam kaplamalarının yapımında Fransızlardan destek alınmıştır. Cumhuriyet döneminde, 1929'da başlayan asfalt kaplama yapımı, 1948'de ABD'den sağlanan Marshall Teknik yardımı ile yaygınlaştırılmış ve 1950'de Karayolları Genel Müdürlüğü-KGM'nin kurulması ile sürekli gelişim dönemi başlamıştır. 1950 yılında kurulan Karayolları Genel Müdürlüğü'nün geliştirdiği politikalar çerçevesinde 1967'de 1289 km olan asfalt kaplama yol uzunluğu, 2010 yılında 10781 km'ye ulaşmıştır (Tunç, 2007).

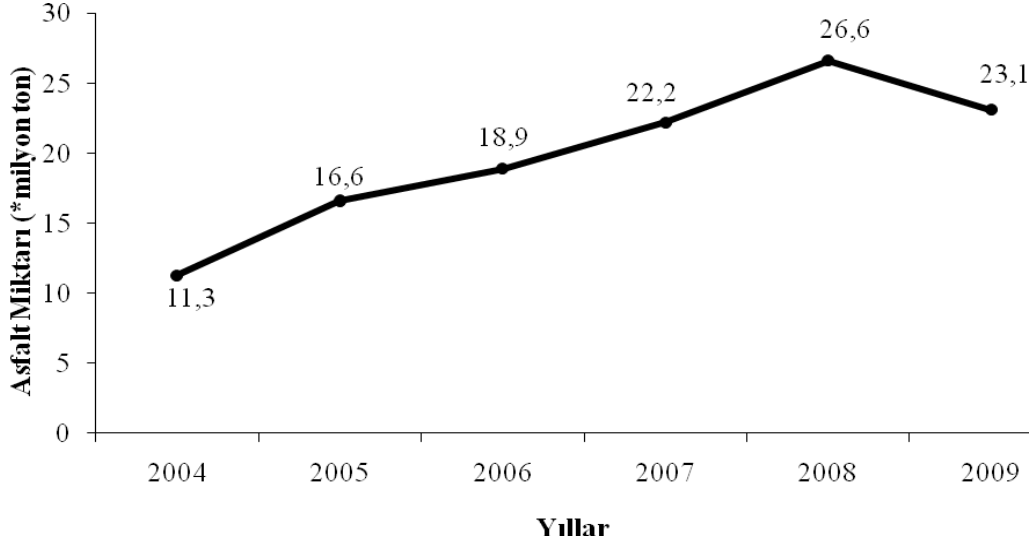
2004-2009 yılları arasında ABD, Avrupa ülkeleri ve Türkiye'de üretilen asfalt miktarları, sırasıyla Şekil 1.1, Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.1 2004-2009 yılları arasında ABD’de asfalt tüketim miktarı



Şekil 1.2 2004-2009 yılları arasında Avrupa’da asfalt tüketim miktarı



Şekil 1.3 2004-2009 yılları arasında Türkiye’de asfalt tüketim miktarı

Ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığında karayolları %95 (Öztürk, 2008) gibi önemli bir paya sahiptir. Artan nüfus ile doğru orantılı olarak artan trafik hacmi etkisiyle mevcut asfalt kaplama yolların kullanım ömürleri azalmaktadır. Özellikle gelişen sanayi bölgelerindeki taşıt sayısının ve dingil yüklerinin artışı yollarda bozulmalara neden olmaktadır. Bu konuda mühendisler ve uzmanlar, yıllardır gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım ve onarım maliyeti düşük asfalt kaplama üretme çabası içinde çeşitli katkıları asfalt içinde kullanmışlardır.

Çubuk doktora tezinde 60/70 penetrasyonlu bitümü, su canlısı olan diatomelerin silisli kabuklarının birikimi ile oluşmuş fosil karakterli bir birikim kayası olan diatomit ile modifiye ederek karışımın marshall stabilitesini ve elastik modülünü incelemiştir. Modifiyeli karışımlara ve kontrol numunelerine ayrı ayrı penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, indirek çekme, tekrarlı sünme deneylerini yapmıştır. Diatomiti esnek üstyapı karışımları içinde ilk kullanan kişi olarak karışımın performansını iyileştirdiğini belirtmiştir (Çubuk, 1988).

McDonald (2004) yüksek lisans tezinde, genel olarak yol yapımında kullanılabilecek plastik, uçucu kül, parça lastik, kiremit parçaları, kömür yan ürünleri, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama, atık cam gibi atık malzemeleri araştırmıştır. Bu atık malzemelerden olan camın asfalt performansına etkisi çeşitli çalışmalarla denenmiştir (Su and Chen, 2002). Huang ve arkadaşları da camın maksimum tane boyutu 4.75 mm ve karışımda bulunma yüzdesi %10-15 olmak şartıyla bitümün mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir (Huang, et al.,2007).

Doğal kaynakların hızla tükendiği günümüz şartlarında agregaların yaygın olarak ocaklardan temin edilmesine alternatif çözümler arayan araştırmacılar, mermer kırıklarını asfalt betonu içinde kullanmışlardır (Akbulut ve Gürer, 2006; Huang et al., 2007). Agregada mekanik özellikleri, marshall stabilite dayanımı ve akma değerleri sınırlar içerisinde kalmış, mermer atıklı asfalt betonunun orta ve düşük trafik hacimli kaplamaların binder tabakaları için kullanılabilir olduğunu belirlemişlerdir. Filler malzemesi yerine de sönmüş kireci belirli oranlarda kullanarak deneysel çalışmalar yapan Seçginli (2007), %4 olarak belirlediği en uygun kireç katkı oranıyla soğuk iklim koşullarına ve suya karşı daha dayanıklı, mukavemeti katkısız numunelere göre daha yüksek olan karışımlar elde etmiştir.

Literatürde, yol kaplamalarının iki ana malzemesinden biri olan agregada yerine kullanılabilecek farklı malzemelerin araştırıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Tuncan vd. 2003 yılında yaptıkları çalışmada, filler yerine uçucu kül ve mermer tozu kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Tek tip agregada, tek tip bitüm (70/100 penetrasyon sınıfı), 3 farklı lastik ve plastik oranı (%5, 10 ve 20), 3 farklı lastik parça boyutu (4.75-0.85mm, 0.85-0.075mm, 4.75-0.075mm) ve 1 plastik parça boyutu (0.75-2.00mm) kullanarak numuneler üretmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, plastik katkının numunelerin dayanımını arttırdığını, lastiğin ise azalttığını, 4.75 -0.075mm parça boyutlu lastik katkısı ile en iyi indirek çekme dayanımının elde edildiğini, ayrıca mermer tozu ve uçucu külün filler malzeme olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir (Tuncan vd.,2003).

Yemen’de kent içi ve kent dışı yollarda sıklıkla bazalt agregada yerine kullanılan granül volkanik külün etkilerini Naji ve Asi (2008) de araştırmışlardır. Bu alanda yaptıkları çalışma neticesinde, granül volkanik külün hem teknik olarak, hem de çevreye verdiği zararın azaltılması anlamında kullanımının uygun olduğunu

belirtmişlerdir. Bu katkı malzemesi asfalt betonunun resilient modülünü ve yorulma ömrünü arttırmış, ancak, asfalt betonu içinde kullanım oranı %10'u geçtiği durumda indirek çekme dayanımını azaltmıştır.

Literatürde katkı malzemelerinin bitüm içerisinde kullanıldığı araştırmalar da mevcuttur. Çubuk ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada, bitümün epoxy resin ile modifikasyonunu incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu bitüm içine farklı miktarlarda epoxy resin ilavesi sonucunda, sıcaklığın ve katkı miktarının bir fonksiyonu olarak viskozitesindeki değişimi araştırmışlardır. Epoxy ilavesinin etkilerini ölçmek üzere penetrasyon, yumuşama noktası, DSR (dinamik kesme reometresi), RTFOT (dönel ince film halinde ısıtma kaybı), PAV (basıncı yaşlandırma), BBR (kiriş eğme reometresi) ve yüzey gerilme testlerini uygulamışlardır. Bütün deneysel çalışmanın sonucunda en iyi performans özelliklerini sağlayacak katkı miktarının %2 olduğunu bulmuşlardır. Bu miktar katkıyla tekerlek izi, kuma, soyulma ve çatlama etkilerinde farkedilebilir bir azalma gözlenmiştir. Ağır trafik yükü olan yollarda, sıcak iklimlerde, nemli bölgelerde, istasyon, terminal gibi alanlarda tekerlek izi, kuma, yaşlanma, çatlama ve soyulmaları önlemek amacıyla epoxy resin katkısını önermişlerdir (Çubuk vd.,2009).

Al-Khateeb ve Al-Akhras portland çimento katkılı asfalt betonunun özelliklerini belirlemek için Superpave test yöntemini kullanmışlardır. 2011 yılında yaptıkları bu çalışmada 6 farklı çimento/bitüm oranı (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 ve 0.30) kullanmışlardır. Superpave rotasyonel viskozite (RV) ve dinamik kesme reometresi (DSR) testlerini uygulamışlardır. RV testini ortalama karıştırma ve serme sıcaklığı olan 135°C ve 7 farklı (5, 10, 20, 30, 50, 60 ve 100 rpm) dönme hızında, DSR testini ise, 4 farklı sıcaklıkta (58, 64, 70 ve 76 °C Yüksek performanslı Superpave sınıfı sıcaklığı olan 64, 1 altı ve 2 üstü sıcaklıklarda) yapmışlardır. DSR testinde yükleme frekansı olarak 10 rad/s (1.59 Hz) kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, Portland çimento katkılı asfalt betonunun 135 °C derecede ve farklı dönme hızlarında rotasyonel viskozite (RV) değeri artmış, bu artışın dengede kalabilmesi için en uygun çimento/bitüm oranı 0.15 olarak bulunmuştur. C/A oranının artması bütün sıcaklıklarda tekerlek izi parametresini büyümüştür (Al-Khateeb and Al-Akhras, 2011).

Trafik ve çevre koşulları ile ortaya çıkan tekerlek izi problemi, araştırmacıların sıklıkla çözüm aradığı bir konudur. Bu kalıcı deformasyonların azaltılması, önlenmesi

ve kontrol altına alınması amacıyla değişik polimer modifiye malzemeleri farklı yöntemlerle yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar polimer katkıların düşük sıcaklıkta asfalt karışımının performansını düşürürken, yüksek sıcaklıkta iyileştirdiğini (Yousefi, 1999) göstermektedir. King ve arkadaşları birlikte yaptıkları çalışmada polimer modifiyelerin büyük gerilmelerin olduğu yoğun trafik hacmine maruz tabakaların modifiyesi için kullanıldığını, polimerle modifiye edilmiş kaplamaların tekerlek izi ve termal çatlak dayanımının yüksek, yorulma, soyulma hasarları ve ısı geçirgenliğinin düşük olduğunu belirtmişlerdir (King et al., 1999).

Zoorob ve Suparma düşük yoğunluklu polietileni (LDPE), asfaltta agreganın hacimsel olarak % 30'u yerine LDPE kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın sonunda agreganın LDPE ile bu kısmi değişikliği sayesinde Marshall stabilitesinin %250 artmış olduğunu, Marshall katsayısının daha güçlendiğini, 60°C'de 1 saat yükleme sonunda numunelerin sünme ve indirek çekme dayanımının kontrol numunelerine göre daha düşük olduğunu, statik indirek çekme dayanımının daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır (Zoorob and Suparma, 2000).

4 farklı polimeri (EVA, EVA/LDPE karışımı, toz lastik ve ABS) bitüm modifikasyonu için kullanan Garc'a-Morales vd. (2006), her birinin farklı davranışlar sergilediğini belirtmişlerdir. Atık lastik, bir elastomer olarak trafik yüklerine karşı dayanımı sağlayan yüksek esneklik özelliği sağlamıştır. EVA ve LDPE polimer karışımı yüksek servis sıcaklıklarında olumlu sonuçlar vermiştir. Atık lastiğin, düşük servis sıcaklıklarında, kullanılan bütün polimerler arasında en ilginç modifikatör olduğunu söylemişlerdir. Lastik katkısının kaplamalarda ağır trafik yüklerinden meydana gelen gerilme çatlaklarına benzeyen ısı çatlaklarının yayılmasını önleyeceğini, Polyolefins ve toz lastik karıştırılırsa hem yüksek hem düşük servis sıcaklığında iyi reolojik özellikler elde edilebileceğini, geniş bir sıcaklık aralığında iyi bir bitüm davranışı gözleyebilmek için karışım ağırlığının % 3.5 oranında EVA/LDPE ve %3.5 oranında toz lastik karıştırılması gerektiğini, 135 °C'de bitümün viskoz özelliklerinin polimerlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışına bağlı olduğunu söylemişlerdir

Punith ve Veeraragavan, düşük yoğunluklu polietilen içeren naylon poşet katkısının asfalt betonunda kullanılabilirliği üzerine 2007 yılında bir çalışma yapmışlardır. 80/100 penetrasyon sınıfı bitüme farklı oranlarda (bitüm ağırlığının 2.5, 5.0, 7.5 ve 10%) polietilen katmışlardır. Dinamik sünme, indirek çekme, resilient

modülü ve Hamburg tekerlek izi testlerini uygulamışlardır. Genel olarak katkısız bitümle karşılaştırıldığında sonuçların daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Test sonuçlarına göre, tekerlek izi ve sıcaklık hassasiyeti polietilen katkısıyla azaltılabilmiş ve kullanılacak en uygun polietilen miktarı %5 olarak önerilmiştir (Punith and Veeraragavan, 2007).

19 mm uzunluğundaki polifiberi, toplam karışım ağırlığının % 0.3'ü, % 0.6'sı ve % 1'i olarak belirlediği oranlarda asfalt karışımı üzerinde uygulayan Yücel, hazırladığı yüksek lisans tezinde polipropilen liflerin etkilerini araştırmıştır. 143°C'de karışım sıcaklığı ve 50/70 penetrasyon sınıfı bitümle ve Yollar Fenni Şartnamesindeki Tip 1 gradasyonlu agregayla hazırladığı numunelere klasik marshall deneyleri uygulamıştır. Sonuçta polifiber ilavesiyle asfalt karışımların stabilite ve akma değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir (Yücel, 2007).

Polipropilenin asfalt karışım performansına olan etkilerini Tapkın da incelemiştir. Yaptığı Marshall ve indirek çekme dayanımı deneysel çalışmalarının sonunda bitümün polipropilen ile modifiyesi ile numunelerin Marshall stabilitesinin arttığını, akma değerinin azaldığını, yorulma ömrünün uzadığını (%1 polipropilen katkı oranıyla yorulma ömründe %27 uzama), tekerlek izi dayanımının arttığını, yansıma çatlaklarının azaldığını belirlemiştir (Tapkın, 2008; Zhang, 2010). Tapkın arkadaşları ile birlikte 2009 yılında yaptığı çalışmada da bitüm modifikasyonunda yerli ve ucuz maliyetle üretilebilen polipropilen fiberleri kullanmışlardır. Polipropilen fiberleri değişik tip ve oranlarda kullanarak asfalt karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Modifiye edilmiş karışımların marshall stabilite değerlerinde %12 ile 40 arasında artışlar gözlemlenmiştir. Optimum bitüm ve optimum polipropilen oranlarıyla hazırlanan numunelere tekrarlı sünme deneyi uygulanmış ve modifiye edilmiş numunelerin ömürleri kontrol numunelerine göre 5-12 kat arası artış göstermiştir. Deneysel çalışmalarının sonunda tekerlek izinde oturma problemine karşı modifiye edici malzeme olarak polipropilenin ekonomik ve kalıcı bir çözüm olabileceğini önermişlerdir (Tapkın vd., 2009).

Asfalt betonu için yapılan deney sonuçlarının matematiksel modellerle değerlendirildiği çalışmalar da mevcuttur. Tapkın ve arkadaşları 2009 yılında polipropilen modifiyeli asfalt karışımın tekrarlı sünme deney sonuçlarını tahmin etmek üzere yapay sinir ağları yöntemini kullanmışlardır. Polipropilen tipi, numune

yüksekliği, birim ağırlığı, agregalar arası boşluk oranı, bitümle dolu boşluk oranı, dinlenme süresi ve vuruş sayısı değerlerine bağımlı olarak bulunan birikimli deformasyon değerini veren yapay sinir ağı (YSA) modelinin doğru, hızlı ve pratik sonuçlar verdiğini, kullanılabilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Tapkın et al., 2009). Tapkın vd. 2010 yılında yaptıkları bir diğer çalışmada da, fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek üzere bitüm içine kattıkları polipropilen katkısı ile ürettikleri asfalt karışımının Marshall test sonuçlarını tahmin etmek üzere yapay sinir ağı yöntemini kullanmışlardır. Polipropilen katkısının Marshall dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Yapay sinir ağı yöntemini kullanarak polipropilen tipi, polipropilen yüzdesi, bitüm yüzdesi, numune ağırlığı, birim ağırlığı, agregalar arası boşluk oranı ve bitümle dolu boşluk oranına bağlı olarak Marshall stabilitesi ve akma değerini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarının sonunda, bu alanda çalışacak olan araştırmacılara Marshall stabilitesi ve akma değerlerini tahminde YSA'nın oldukça iyi sonuçlar verdiğini, hızlı, pratik ve kullanılabilir olduğunu önermişlerdir (Tapkın vd., 2010).

Zhang vd. 2010 yılında yaptıkları çalışmada polipropilen/atık lastik tozu karışımının bitüm içine katılması sonucu oluşacak polimerlerin, karışımın mekanik özelliklerinde meydana getireceği değişiklikleri tahmin için yapay zeka yöntemini kullanmışlardır. Bunun için hazırladıkları bilgisayar programına RCAD (Bilgisayar Destekli Lastik Tasarımı) adını vermişlerdir (Zhang et al., 2010).

Fang ve arkadaşları 2008 yılında karışım içine geleneksel polimer modifikatörler yerine plastik poşet katarak (numune ağırlığının 2%, 4% ve 6% oranlarında), parlama noktası, penetrasyon, duktilite, düşük sıcaklıkta çatlama performansı ve mikro yapı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuçta bu katkıyla karışımın bütün özelliklerinin iyileştiğini vurgulamışlardır. Gerilme-şekil değiştirme testi sonucuna göre viskolelastik ve plastiklik özelliklerinin geliştiğini ki bunun da özellikle düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımı arttırdığını belirtmişlerdir (Fang et al., 2008; Kök ve Kuloğlu, 2007).

Yapılan çalışmalar, plastik atıkların, geri dönüştürülerek yol kaplamalarında kullanılabilir olduğunu göstermektedir (Giriftinoğlu, 2007). Özellikle Amerika, Kanada, Avrupa ve Avustralyada yaygın olarak tercih edilen polimer katkılar, tekerlek izi ve yansıma çatlaklarını azaltmaktadır (Yıldırım, 2007).

Polimer kökenli olan Styren-Butadien-Styren (SBS) de asfalt performansını ve davranışını iyileştirmek amacıyla birçok araştırmaya konu olmuştur. Airey, 2003 yılında yaptığı çalışmada SBS ile modifiye edilmiş (bitüm ağırlığının %3, 5 ve 7 oranlarında katarak) 2 penetrasyon sınıfı bitümün reolojik özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan numunelere penetrasyon, parlama noktası, Fraass kırılma noktası, düktilite elastik geri dönme ve dönel viskozite testlerini uygulamış ve sonuçta SBS polimeri ile modifiye edilmiş bitümün bütün reolojik parametrelerinin iyileştiğini belirlemiştir. Bitümün yaşlanmasını, bitümde oluşan fiziksel ve kimyasal değişiklikler olarak tarif etmiş ve bunun hakkında fikir sahibi olabilmek üzere Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) testini uygulamış ve bunun sonucunda da yaşlandırılmış bitümün bütün reolojik özelliklerinin değiştiğini vurgulamıştır (Airey, 2003). SBS modifiyerinin bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaşlanma özellikleri üzerindeki etkilerini de Ahmedzade ve Yılmaz 2007 yılında yaptıkları çalışmada incelemiştir. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıları RTFOT yöntemiyle yaşlandırmışlar, yaşlandırma işleminden önce ve sonra bağlayıcılara penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerini uygulamışlardır. B 50/70 penetrasyon seviyesindeki bağlayıcıyı, B 70/100 ve B 100/150 ana bağlayıcılarına %3.0, B 160/220 ana bağlayıcısına %6.0 SBS kullanarak sağlamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonunda SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığını, ısıya karşı duyarlılığın ve yaşlanma etkisinin azaldığını belirlemiştir (Ahmedzade ve Yılmaz, 2007). Yılmaz ve Ahmedzade kısa dönem yaşlandırma için en çok kullanılan TFOT ve RTFOT yöntemlerini, 160/220 sınıfı bitüm içine %1.5, 3, 4.5 ve 6 oranlarında SBS ilavesiyle modifiye ettikleri bitümler üzerinde karşılaştırdıklarında, yaşlandırmadan öncesi ve sonrasında SBS içeriği arttıkça numunelerin yumuşama noktası değerinin yükseldiğini, penetrasyon ve ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığını ve TFOT yöntemiyle RTFOT yöntemine göre daha çok yaşlanma meydana geldiğini belirlemiştir (Yılmaz ve Ahmedzade, 2008).

Yılmaz ve Kök 2008 yılında yaptıkları çalışmada bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS katkısının, bitümün yüksek sıcaklık performansına olan etkisini araştırmışlardır. Katkısız bitüme ve farklı oranlarda (%2, 4 ve 6) SBS katkısını 100/150 penetrasyon sınıfı bitüm içine ilave ederek hazırladıkları modifiyeli numunelere dönel viskozimetre deneyini uygulayarak karışımların sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarını, RTFOT yöntemiyle yaşlandırmadan önce ve sonra numunelere DSR deneyini

uygulayarak bitümün Superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyelerini tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonunda SBS oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığını, yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış bitümlerde SBS oranının artması ile yüksek sıcaklık dayanım parametresinin ($G/\sin\delta$) arttığını belirlemişlerdir (Yılmaz ve Kök, 2008).

2009 yılında Baochang ve arkadaşları, styrene-butadiene-rubber (SBR) içine montmorillonite (MMT) ilavesiyle modifiye edilmiş karışımın özelliklerini belirlemek üzere bir çalışma yapmışlardır. X-Ray metoduyla inceleme sonucunda SBR/MMT nin ideal bir ağ yapısı olduğu gözlenmiştir. Karışımın fiziksel özelliklerini belirlemek için testler yapmışlardır (Yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite). Karışım içine katılan SBR/MMT, karışımın yüksek sıcaklıkta yumuşama noktasını ve viskozitesini arttırmış penetrasyon değerini azaltmıştır. Yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesi (kararlılığı) testi yapılmış, karışımın çok stabil olduğu görülmüştür. Sonuçta SBR/MMT katkılı asfalt betonunun yüksek sıcaklıkta viskoelastik özelliklerinin iyileştiğini ve tekerlek izi dayanımının arttığını vurgulamışlardır (Baochang, et al., 2009).

Bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmak ve üstyapının hizmet ömrünü uzatmak amacıyla elastomerik reaktif terpolimer (ELVALOY RET) ve SBS ile modifiye edilmiş bitümün (50-70 penetrasyonlu bitüm içine %1-5 oran aralığında) penetrasyon ve yumuşama noktası deneysel çalışmasını gerçekleştiren Seyfullah Keyf 2010 yılında yaptığı çalışmanın sonunda, SBS ve Elvaloy RET ile modifiye edilen bitümün penetrasyon değerlerinin azaldığını ve penetrasyon indeksini arttığını, penetrasyon değerindeki azalmaya bağlı olarak modifiye edilmiş bitümün; sıcaklığa karşı dayanımının arttığını, daha uzun kullanım ömrüne sahip olacağını belirlemiştir (Keyf, 2010).

Kanabar hazırladığı yüksek lisans tezinde, polyphosphoric acid (PPA), SBS ve reactive ethylene terpolymer (Elvaloy® RET) polimer katkılarının performanslarını karşılaştırmıştır. Elvaloy® RET ve SBS benzer özelliklerde avantajlar göstermiş, kullandıkları bütün polimerler superpave performansını iyileştirmiş, Elvaloy polimeri yorulma çatlağı dayanımını diğerlerine karşı daha çok güçlendirmiştir (Kanabar, 2010).

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2011) genel olarak esnek kaplamalarda, asfalt betonu ve stone matrix asfaltın modifiye edilmesinin faydalarını araştırmışlardır. Çalışmalarında 70/100 penetrasyon sınıfı bitüm ve %5 SBS kullanmışlar, SBS modifiyeli asfaltta, daha

yüksek parlama noktası, daha düşük ısı geçirgenliği, %4.8 daha yüksek dayanım, resilient modülünde 25°C’de %39.4 artış, tekerlek izi dayanımında %79.8 oranında azalma gözlemlenmiştir.

Dünya nüfusunun artması ile birlikte insanların yaşam ve tüketim anlayışı da değişmektedir. İhtiyaç duyulan doğal kaynaklar idareli kullanılmadığı takdirde azalması ve hatta tükenmesi de kaçınılmazdır. Doğaya ve doğal kaynaklara olan ihtiyaç göz önüne alındığında, bilinçsiz tüketim toplumu olmaktan çıkmalı ve çevre sorunlarına karşı daha duyarlı olunmalıdır.

Kullanılmış lastikler, bu atık maddelerden biridir. Çevre açısından oldukça dayanıklı yüksek molekül yapılı polimerlerden ibaret doğal ve sentetik kauçuklardan üretilen otomobil lastikleri de kullanılıp ömürlerini tamamladıktan sonra depolanması güç, sağlığa oldukça zararlı bakterilerin üremesine müsait çevre sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Atık maddeler çeşitli yöntemler kullanılarak tüketilmeye çalışılmaktadır. Atık lastikler yakılarak tüketilmektedir. Bu kolay ve ucuz bir yöntem olmasına rağmen atık lastiklerin yakılması çevre kirliliği açısından sorun oluşturmaktadır. Birçok ülkede bu yöntem yasaklanmıştır. Son otuz yılda atık maddelerin yapı üretim malzemesi olarak kullanılabilirliği ve yeniden kazanımı konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Atık lastiklerin gerek beton, gerekse asfalt beton kaplamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Birçok farklı alanda değerlendirilen hurda araç lastiklerinin geri kazanılarak kullanıldığı önemli alanlardan birisi de yol yapım ve bakım inşaatlarıdır. Geri dönüştürülmüş hurda araç lastikleri, sessiz asfalt, geçirgen asfalt, yüksek kaliteli asfalt gibi farklı asfalt karışımların üretiminde kullanılmaktadır.

McQuillen ve arkadaşları 1988 yılında, o yıllarda Alaska hükümetinin sıcak asfalt karışımında kullanmakta olduğu lastik atığın fayda (buzlu koşullarda soyulma dayanımı, çatlak dayanımı ve esneklik özelliğini arttırışı, katı atık miktarındaki ve trafik gürültüsündeki azalış) maliyet analizini yapmışlardır. Numuneleri, 2 farklı lastik cinsi, 3 farklı lastik dane dağılımı, 2 farklı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, 2 farklı agrega dane dağılımı, 2 farklı kür süresi kullanarak üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada lastik katkılı asfaltın ekonomik ömrü incelenmiş ancak çalışmaya kayma direncindeki artış ve gürültü azaltma özelliği dahil edilmemiştir. Çalışmalarının sonunda katkısız asfalt betonlarıyla karşılaştırıldığında lastik katkılı asfalt betonunun maliyetler bağlamında oldukça olumlu sonuçlar yarattığını vurgulamışlardır (McQuillen et al., 1988).

Virginia eyaleti, 1989 yılında mevzuat (yasa) ile atık lastiklerin kullanılması planı geliştirmiştir. 1997’de de atık lastiği yüzey kaplamalarında değerlendirmiştir. Yapılan çalışmalarda atık lastik katkısının kaplamada yansıma çatlaklarını azalttığını belirlemişlerdir (Maupin and Payne, 1997).

Yol inşaatında atık lastik, 1950 lerden beri kullanılmaktadır. Doğal lastiğin bitüm içinde kullanılması 1840 lara kadar dayanmasına rağmen. 1960’lara kadar faydaları çok keşfedilmemiştir. Carlson ve Zhu, Phoenix yollarındaki çatlakların tamiri için yöntem geliştirilmesine çalışırken sıcak asfalt karışımı içine parçalanmış lastik ilave etmiş, değişik periyotlarla sürekli karıştırarak ve reaksiyona girmeleri için bekleterek farklı özelliklerde karışımlar elde etmiş ve bu ürüne de asphalt rubber adını vermiştir (Carlson and Zhu, 1999).

1999 da Sacramento eyaletinde yapılan bir çalışmada lastik modifiyeli karışımın trafik gürültüsü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Atık lastik modifiyesiyle hazırlanmış asfalt kaplamalı yolların arazi testlerinde trafik gürültüsünün modifiyesiz kaplamalara göre belirgin oranda az olduğu saptanmıştır. (Sacramento County Department, 1999)

Yeşilata ve arkadaşları da 2007 yılında yaptıkları çalışmada Ülkemizde de her yıl yaklaşık 110.000 ton atık lastiğin oluştuğunu, bu atık lastik potansiyelinin; sönümleyici eleman, enerji geri kazanımında yakıt, bazı kimyasal ürünlerin elde edilmesi aşamasında ise hammadde olarak değerlendirilmekte olduğunu belirtmişlerdir. Atık lastiğin yeniden değerlendirilmesi için boyutlarını küçültecek bir endüstriyel işlem den geçmesi gerektiğini, standart bir otomobil lastiğinin %35’ünün doğal ve %65’inin sentetik olan geri kazanılabilir kauçuktan oluştuğunu ifade eden Yeşilata ve arkadaşları araştırmalarında lastiğin parçalanma yöntemlerine ve asfaltta kullanılabilirliğine değinmişlerdir (Yeşilata vd., 2007a). Yeşilata ve arkadaşları aynı yıl yaptıkları başka bir araştırmada da hurdaya çıkan atık lastiklerin miktarının hızla arttığına, diğer atıklardan farklı olarak lastiklerin hiçbir işlem den geçirilmeden toprak altına gömülemediğine, arazilerde yıllarca bekletilmelerinin, yasal olmayan depolama koşullarının, genel olarak bu atıkların oluşturduğu çevresel sorunların insan sağlığını tehdit etmekte olduğuna yer vermişlerdir (Yeşilata vd., 2007b).

Sugözü ve Mutlu’da atık lastiğin yol kaplamalarında kullanılması ile asfalt yolların daha iyi tutuş sağlayacağından trafik kazalarını azaltacağı görüşünü öne sürmüşlerdir (Sugözü ve Mutlu, 2009).

Palit ve arkadaşları 80/100 penetrasyon sınıf bitümü modifiye için atık kamyon ve otobüs lastiği kullanmışlardır. Laboratuvar koşullarında numunelerin yorulma ve kalıcı deformasyon karakteristiklerini, sıcaklık ve nem geçirgenliğini test etmişler ve deneysel çalışmanın sonunda lastik modifiyeli numuneler kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, lastik modifiyeli karışımın yorulma ve kalıcı deformasyon karakteristiklerinin iyileştiğini, ısı ve nem hasarına karşı daha dayanımlı olduğunu belirlemişlerdir (Palit et al. 2004). Lastikle modifiye edilmiş asfalt betonunun laboratuvar koşulları altında yorulma davranışını inceleyen bir başka araştırmacı da numunelerin yorulma sürelerini belirlemek için sabit basınç deney yöntemini kullanmıştır. Otomobil lastiği ile modifiye edilmiş asfalt betonunun yorulma süreleri önemli ölçüde (50 penetrasyonlu bitüm için yorulma süresinde 2 kat, 100 penetrasyonlu bitüm için 23 kat artış) artış gözlenmiştir (Çelik, 2001). Lastik katkısıyla yorulma ömrünün uzadığı (Neto et al.,2003) ve (Xiao and Amirkhanian, 2010) tarafından da belirlenmiştir.

Yousefi, asfalt için en iyi fiziksel modifikatörlerden olduğunu savunduğu lastiği bitüm içinde incelemiştir. Lastik katkılı karışımda, katkısız karışımlara göre, düşük penetrasyon, yüksek parlama noktası gözlemlenmiş, düşük sıcaklıkta fraas kırılma noktasının iyileşmediğini belirtmektedir (Yousefi, 2002). Düşük penetrasyon, yüksek viskozite değeri olmak üzere, genel olarak lastik, karışımın mühendislik özelliklerini iyileştirmektedir (Kumar et al, 2009; Kim et al., 2010; Jeong et al., 2010; Akisetty et al., 2011).

Bitüm ağırlığının %2, 5, 10 ve 20 oranlarında rendelenmiş lastik kullanılarak yapılan çalışmada hazırlanan numunelerin permeabilitesi ile porozitesi arasındaki ilişkiyi araştırılmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda, porozite ve hava boşluğu arasındaki ölçülebilen ilişkinin bitümlü karışımın gözenekli yapısı hakkında çok iyi fikir verdiğini, 50 penetrasyonlu bitümle hazırlanmış karışımın hava boşluğunun 100 penetrasyonlu bitümle hazırlanmış karışımın hava boşluğundan daha az olduğunu, bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığındaki reolojik özelliklerinin hava boşluğunda olduğu kadar porozitesinde de büyük etkisi olduğu belirlenmiştir (Çelik, 2005).

Yapılmış olan birçok çalışma, lastik katkısının tekerlek izi dayanımında etkili olduğunu göstermektedir (Choubane et al., 1998; Huang et al., 2002; Chiu, and Lu, 2007; Cooper, 2008; Akisetty, C. et al, 2009 a). lastik modifiyeli asfaltlarda kullanılan

lastik boyutunun küçültülmesiyle boşluk oranı azaldıkça tekerlek izi derinliğinde azalmalar görülmektedir (Xiao et al., 2007).

MacLeod ve arkadaşları tarafından, Lethbridge, Alberta ve Canada bölgelerinin iklim koşullarına göre (trafik hacmi ve trafik hızını da göz önünde bulundurarak) asfalt kaplamaya ilave edilen atık lastiğin etkilerini araştırılmıştır. Katkılı numunelerin vizkozitesinin arttığı, düşük sıcaklıkta depolama stabilitesinin arttığı, segregasyonun azaldığı, lastik oranı arttıkça parlama noktasında çok önemli olmayan bir düşüş görüldüğü belirtilmiştir (MacLeod, et al., 2007).

Oregon Department of Transportation (ODOT) 1993-1999 yılları arasında lastik modifiyeli inşa edilmiş 17 ayrı otoyolu projesini incelemiş, arazi testlerini yapmış ve yayınladığı raporda, atık lastik katkılı bitümden üretilen esnek kaplama bölgesinin, kontrol bölgesine oranla daha iyi bir performans sergilediğini, atık lastik katkısının çatlak ve deformasyon oluşumunu azaltarak asfalt tabakasının ömrünü uzattığını ve bakım-onarım maliyetlerini azalttığını belirtmiştir (Hunt, 2002). Chiu 2000-2001 yıllarında yürüttüğü projesi kapsamında 2 farklı lastik katkılı asfalt kısım inşa etmiştir. Değişik zaman dilimlerinde alan üzerinde gözlemler ve ölçümler yapmıştır. Chiu 4 yıllık alan çalışması sonuçlarına göre lastik modifiyeli asfalt betonunun yerel malzemelerle inşa edilmiş asfalt betonuna göre çok daha başarılı olduğunu, ayrıca kuma eğiliminde de azalma görüldüğünü belirtmiştir (Chiu, 2008). Atık lastik katkısının kuma eğilimi üzerindeki olumlu etkisi, Phetcharat ve Kongsuwan'ın 2003 yılında yaptıkları çalışmada da açıkça görülmektedir (Phetcharat and Kongsuwan, 2003).

40 yıllık süreçte, atık lastik katkısını, geri dönüştürülmüş asfalt ve atık cam katkılarıyla karşılaştıran Chiu vd., yol bakım ve onarımları sırasındaki malzeme ve enerji verimliliği açısından lastik atık katkılı asfalt karışımın diğerlerine oranla daha verimli olduğunu saptamışlardır (Chiu et al., 2008). Atık lastik etkisini başka katkılarla karşılaştırmak üzere Aflaki ve Tabatabaee de birlikte yaptıkları çalışmada İranın iklim koşullarına özel olarak üretilen ve farklı malzemelerle (toz lastik, gilsonit, polifosforik asit ve SBS) modifiye ettikleri bitümlerin superpave performanslarını incelemişlerdir. DeneySEL çalışmalarının sonunda, kullandıkları bütün katkıların yüksek sıcaklıkta bitüm performansını iyileştirdiğini, atık parçalanmış lastikle üretilen modifiye bitümün hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki performansında iyileşme olduğunu ancak

incelenen iklim koşulları için kullanılan katkıların hiç birinin tam anlamıyla yeterli olmadığını tespit etmişlerdir (Aflaki, and Tabatabaee, 2009).

Atık lastik katkısını, SBS ile karşılaştırmak üzere Kök ve Çolak yaptıkları çalışma sonunda, yorulma davranışlarının benzer olduğunu, en uygun lastik oranının %8 olduğunu, hem maliyetinin daha düşük hem de çevreye olan katkısından dolayı lastik atığının SBS ye göre tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Kök ve Çolak, 2011).

Öngel vd. 2008 yılında yaptıkları çalışmada, lastik katkılı kaplamanın ses seviyesi üzerinde, hava boşluk oranının, agrega gradasyonunun, yaşın, yüzey pürüzlülüğünün, yüzey yapısının, katman kalınlığının etkilerini araştırmışlardır. Çalışma en fazla 8 yıllık olan 72 kesit için yapılmıştır. Verilerin betimsel istatistikleri çıkarılmış ve çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Sonuçta hava boşluk oranı artınca ses seviyesinin azaldığını belirlemişlerdir (Öngel, et al., 2008).

Lastik tipi, boyutu ve kullanıldığı oran karışımın performansını etkileyen faktörlerdir (Putman et al., 2005). Lastik tipi ve boyutu gibi, lastik tanelerinin yüzey alanı özelliğinin de performans üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir (Shen et al., 2009). Lastik tipinin ve tane boyutlarının kaplama performansı üzerine olan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, İndirekt çekme dayanımının, toz taneciklerin boyutundan etkilenmediği, toz lastik türü ne olursa olsun tane boyutu büyüdükçe karışımın resilient modülünün azaldığı, yorulma ömrünün uzadığı belirlenmiştir (Xiao et al., 2009d). Farklı şekil ve boyuttaki atık lastiklerin asfalt betonu içerisindeki etkisini araştıran Karacasu ve Bilgiç de 2009 yılında yaptıkları çalışmada, sert plastik parçaları, araç lastiği parçacıkları ve atık lastik tozu kullanmışlardır. Deney sonuçlarında, atık oranı arttıkça pratik özgül ağırlığın azaldığı, boşluk oranının arttığı, bitümle dolu boşluk oranının azaldığı, Marshall dayanımının azaldığı, akma miktarının arttığı sonuçlarına varmışlar ve bu atıkların belli miktarda dayanım beklenen ve az miktarda yağış alan bölgelerde yapılacak olan yollarda kullanılabileceğini önermişlerdir (Karacasu ve Bilgiç, 2009).

Otomobil lastiklerinin granül hale getirilerek, farklı oranlarda (%2.0, %1.0, %0.7 ve %0.5) bitümlü sıcak karışıma katıldığı çalışmanın sonunda, normal sınırlar içinde kalmak üzere katkısız karışıma göre düşük stabilite değerleri, düşük sıcaklıkta düşük dolaylı çekme mukavemeti, ancak sıcaklık yükseldikçe daha yüksek dolaylı çekme

mukavemeti, 5 ve 25°C’de sınırdadır, 40°C’de ise uygun sınırlar arasında rijitlik modülü değerleri bulunmuştur. Kullanılmış otomobil lastiği katkılı asfaltın, katkısız asfalta göre daha elastik olduğu ve düşük sıcaklık nedeniyle meydana gelebilecek çatlak oluşumuna karşı direncin arttığı, asfalta katılması gereken en uygun lastik atık oranının 0.5 olduğu tespit edilmiştir. Kullanılacak otomobil lastiği atıklı asfalt betonunun soğuk iklimli bölgelerde düşük ısı çatlaklarına ve tekerlek izine karşı dirençli olduğunu, sıcak ve ılıman iklimli bölgelerde ise kalıcı deformasyon, stabilite ve çekme mukavemeti özellikleri açısından katkısız asfalt betonuna göre daha az direnimsiz olduğunu vurgulamışlardır (Deniz vd., 2010). Arabani vd. de asfalt kaplamalarda değişik yükleme ve sıcaklık koşulları altında oluşan çatlaklar üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bitüm ağırlığının %0, 1, 3, 5’i oranlarında atık lastik kullanarak hazırladıkları numunelere yapılan testler sonucunda, katkılı numunelerin esnekliği katkısız numunelere göre farkedilir derecede yüksek çıkmıştır. Sünme testi sonuçlarına göre kalıcı deformasyon derinliğinin az oluşundan dolayı sabit yük etkisi altındaki kaplamalarda bu katkının kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir (Arabani et al., 2010).

Atık lastik bitümlü bağlayıcıya katılabileceği gibi doğrudan karışıma da katılabilmektedir. Amirkhanian, hem ıslak hem de kuru yöntemle hazırlanmış karışımların performanslarını karşılaştırmıştır. Atık lastiğin doğrudan veya bitüme karıştırılarak elde edilen asfalt betonlarının kayma direncinin katkısız karışımlara göre daha iyi olduğunu belirlemiştir (Dhir et al., 2001)

Otomobil lastiğini agregaya ilave etmek suretiyle modifiye edilmiş asfalt betonu, hem sıcak hem soğuk iklimli bölgelerde iyi bir çözüm olarak önerilmektedir (Tortum et al., 2005). Atık lastiğin çevrede oluşturduğu kirliliğini azaltmak ve asfalt karışım özelliklerini iyileştirmek amacıyla Cao (2007)’da yaptığı çalışmada atık lastiği kuru karışıma ilave etmiştir. Atık lastik katkısı, karışımın yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı ve düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı gösterdiği dirençte önemli ölçüde etkili olmuştur (Cao, 2007). Zhao-yi He ve arkadaşları da 2010 yılında birlikte yaptıkları çalışmada %10, 15, 20 ve 25 atık lastik tozu ile modifiye edilmiş karışımın tekerlek izine, çatlamaya ve yorulma etkilerine karşı dayanımlı olduğunu belirlemişlerdir (He et al., 2010).

Cao ve Bai atık otomobil lastiği katkısının genelde kuru karışıma ilave edildiğine dikkat çekerek, kendileri ıslak karışımda kullanmışlardır. Test sonuçlarına göre penetrasyon değeri düşmüş, yumuşama noktası yükselmiştir (Cao and Bai, 2007).

Gandhi tezinde, Asphamin ve Sasobit'in bitüm özelliklerine etkilerini incelemiştir. Bu iki katkı da karışımın özelliklerini farklı farklı etkilemiştir. Sasobit katkısı 135 °C ve 120 °C'de bitümün viskozitesini önemli derecede azaltmış, ancak Asphamin aynı sıcaklıkta aynı etkiyi göstermemiştir. Her iki katkı da orta sıcaklıkta bitümün reolojik (sünme, elastik geri dönme ve kompleks modülü) özelliklerini iyileştirmiştir. Her iki katkıyla modifiye edilmiş ve yaşlandırılmış karışımda da kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında tekerlek izi derinliğinde önemli bir fark görülmemiştir (Gandhi, 2008). Asphamin ve Sasobit'in bitüm üzerine etkilerini inceleyen bir başka araştırmacı, test sonuçlarına göre katkılı karışımın hem karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının azaldığını hem de uzun dönemdeki performansının da olumlu etkilendiğini belirlemişlerdir (Xiao et al., 2009c). Bunun yanında Akisetty ve arkadaşları da 2010 yılında yaptıkları çalışmada Aspha-min® ve Sasobit katkısının kontrol numunelerinden çokta farklı sonuçlar vermediğini, ancak katkılı numunelerin mühendislik özelliklerinin negatif yönde de etkilenmediklerini, belirlemişlerdir (Akisetty et al., 2010). Lastik katkısı, türü ve parçalanma şekli karışımın viskozitesi üzerinde önemli bir role sahiptir (Thodesen et al., 2009; Akisetty, C., K., et al, 2009b). Navarro ve arkadaşları da %9 oranında parçalanmış lastik ile modifiye edilmiş numunelerde, bitüme katılmış olan parça lastik katkısının yüksek servis sıcaklığında hem lineer viskoelastisite modülünü hem de viskoziteyi arttırdığını gözlemlemişlerdir. Karışımın içinde çözülmeyen taneciklerin bulunması karışımın akışkanlığını etkilemiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda katkı olarak kullanılan lastik parçacıklarının 0.35 mm.den küçük olmasını ve lastiğin yüksek devirli hızla öğütülmesini tavsiye etmişlerdir (Navarro et al., 2004).

Çeşitli yükleme, çevre ve deney şartlarında asfalt karışımların performanslarının ve davranışlarının hesaplanabilmesi ve öngörülebilmesi için sıklıkla YSA yönteminden yararlanılmıştır. Hem geleneksel istatistik hem de yapay zeka yöntemlerine başvuran araştırmacılar, YSA yönteminin daha başarılı sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır (Sayın ve Tanyıldızı, 2006; Xiao et al., 2009a; Xiao and Amirkhanian, 2009; Thodesen et al., 2009).

Son yıllarda atık lastik gibi yan ürünlerin asfalt teknolojisinde kullanımı hem ekonomiye hem çevre kirliliğinin azaltılmasına hem de asfaltın ömrünü uzatmada sağladığı katkılardan dolayı Amerikada ve dünyanın pek çok ülkesinde yaygınlaşmıştır. Xiao hazırladığı tezinde bu kadar yaygın olarak kullanılan geri dönüştürülmüş asfalt içeren CRM modifiyeli asfaltın, daha önceden incelenmiş çevreye ve ekonomiye sağladığı katkıların dışında kalan çatlama dayanımı ve bunun tahmin modeli oluşturulması konusunda çalışmıştır. 2 farklı tip agrega kaynağı içeren 39 karışım dizayn etmiş, çatlama dayanımlarını test edip regresyon ve ANN ile modellemiştir. Yaptığı çalışmalar sonunda geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ve atık lastiğin türü ne olursa olsun asfalt karışım içerisinde kullanıldıkları yüzde arttıkça karışımın viskozitesinin arttığını, RAP oranı arttıkça G^* 'sinin değerinin arttığını, uzun dönem yaşlandırma süresinde türüne bağlı olmaksızın crumb rubber kullanmanın G^* 'sinin değerini düşürmede yardımcı olduğunu belirlemiş, oluşturduğu tahmin modelleme için ANN nin regresyon analizinden daha doğru sonuçlar (%84 doğrulukla) verdiğini vurgulamıştır (Xiao, 2006).

Lee doktora tezinde geri dönüştürülmüş atık lastiğin asfalt modifiyesi alanında kullanımının 40 yıldan fazla bu sektörde ilgi alanı olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında CRM modifiyeli karışımın, karıştırma çeşitliliğinin, karışımın özelliklerine etkilerini, yapay olarak uzun dönem yaşlandırılmış CRM modifiyeli bitüm özelliklerini, yaşlandırılmış CRM modifiyeli bitüm ile daha elastik bir bitümün karıştırıldığı durumdaki özelliklerini araştırmıştır. Çalışmaları sırasında istatistiksel analizler (ANOVA analizi) için Statistical Analysis System (SAS) ve Excel programlarını kullanmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda, CRM modifiyeli karışımlar için etkileşim süresi ve sıcaklığının, karışımın özellikleri üzerindeki etkisinin büyük olduğunu (uzun süre ve yüksek sıcaklığın viskoziteyi arttırdığını), CRM oranının viskoziteyi etkilediğini, uzun dönem yaşlandırılmış kontrol ve CRM'li karışımların yaşlanma seviyelerinde istatistiksel açıdan önemsiz farklar bulunduğunu belirlemiştir (Lee, 2007). Akisetty de doktora tezinde Aspha-min® ve Sasobit®'in, 5 farklı CRM modifiyeli bitüm viskozitesi, kompleks modülü ve yaşlanma özelliklerine etkilerini araştırmıştır. İstatistiksel analizler, katkıların bitüm türünden bağımsız olarak viskoziteyi etkilediğini göstermiştir. Sasobitin 135°C'de viskoziteyi azalttığını, düşük sıcaklıkta çatlama potansiyelini arttırdığını, lastik modifiyeli karışımın yüksek sıcaklıkta

özelliklerinin iyileştiğini, genel olarak WMA teknolojisinin CRM katkılı karışımların tekerlek izi dayanımı, nem geçirgenlik ve resilient modülü özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturmadığını belirlemiştir (Akisetty, 2008).

Peralta farklı bitüm ve atık lastiğin etkileşimlerini incelemiştir. Çalışmasında bitümün yaşlandırılması ve atık lastik ile modifiyesinin tamamen fiziksel ve reolojik değişikliklere (yoğunluğunun, sertliğinin, viskozitesinin, elastikliğinin artması, penetrasyon değerinin azalması gibi) neden olduğunu, atık lastik parçalarının bitüm tarafından absorbe edildiğini, karıştırma sıcaklığı sırasında bu taneciklerin şiştiğini (ağırlıklarının %250-300 oranında), maksimum elastik geri dönmenin elastik (150/200 penetrasyon sınıfı) bitüm ile sağlandığını belirlemiştir (Peralta, 2009). CRM'in bitüm içerisinde kullanılmasıyla meydana gelen bu hacimsel değişiklik, karışımın sıkıştırılabilme özelliğini değiştirmektedir. Lee vd. (2007)'ne göre CRM'li sıkıştırılamayan karışımlarda boşluk oranı katkısız karışımlara göre daha fazla olmakta ve bu da tekerlek izinde oturma miktarını arttırmaktadır. Çelik ve Atış (2007)'a göre de tane boyutu büyüdükçe karışımın işlenebilirliği azalarak, sıkıştırma işlemi için daha fazla enerjiye gereksinim duyulmaktadır.

Farklı boyut ve şekillerdeki atık lastiklerle, farklı yöntemlerle asfalt karışımlar üretilmektedir. Karışımların geleneksel asfalt karışımlarla karşılaştırıldığında çoğunlukla daha iyi performanslar sergilemeleri atık lastik katkılı asfalta olan ilgiyi arttırmaktadır. Amerika'da özellikle öğütülmüş lastikten üretilen katkı maddelerinin kullanımı kanunlarla desteklenmektedir. ISTE(A Intermodal Surface Transportation Efficiency Act) bölüm 1038' e göre herhangi bir şekilde federal kaynaklarla üretilen asfalt kaplamalarda öğütülmüş lastiklerin kullanımının gerekliliği vurgulanmıştır (Camp et al., 1997; Blumenthal, 2002).

Asfalt kaplamalarda beklenen performans artışını sağlamak ve çevreye zararlı atıkları değerlendirmek amacıyla çok çeşitli modifiye asfalt üretimine literatürde sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmalar arasında asfalt içerisinde ömrünü tamamlamış otomobil lastiğinin farklı boyutlarda ve oranlarda kullanımı da yer almaktadır.

Bu çalışmada asfalt içinde kullanılacak hurda lastik şimdiye kadar denenmiş ve kullanılmış yöntemlerden farklı bir yöntemle öğütülmüş ve üretilmiştir. Elektron mikroskobu fotoğraflarıyla da desteklenen, mısır patlağına benzer yapısı sayesinde karışımın performansına katkılar sağlamıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmanın ikinci

bölümünde dünyada ve Türkiye’de yapılmış benzer çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde karayolu üst yapısı ve kullanılan malzemeler hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde uygulanan deneyler ve sonuçları detaylı olarak açıklanmıştır. Altıncı bölümde deney sonuçları özetlenmiş, yapılan çalışmanın ülke ekonomisine olan katkıları yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2

KARAYOLU ÜST YAPISI

Yolun, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak üzere altyapı üzerine inşa olunan ve alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan kısma üstyapı denir (Yayla, 2009). Karayolu üstyapısı taşıtlara düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koymak, temel tabakasına iletilen kayma direncini azaltmak üzere inşa edilir (İsfalt, 2001). Yol kaplamaları;

- Esnek
- Rijit
- Kompozit, olmak üzere 3 farklı şekilde yapılabilmektedir (Tunç, 2007).

2.1. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapı yolun trafik yüklerini taşıyan, gerilmeleri taban zeminine dağıtan, stabilitesi; tane sürtünmesine, adezyon, kohezyon gibi kullanılan agrega ve bağlayıcı malzemenin özelliklerine göre değişen, farklı özelliklere sahip farklı tabakalardan yapılan çok tabakalı üstyapı şeklindedir (İsfalt, 2001; Tunç, 2007).

Esnek üstyapılar;

- Konforlu sürüş için düzgün yüzeylere sahip,
- Emniyetli sürüş için yeterince kayma direncine sahip,
- Trafik yüklerinin etkilerinden ötürü kalıcı deformasyonlara karşı yeterince dirençli,
- Tabakaları, yükleri zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde yayabilmesi için yeterli kalınlık ve mukavemete sahip,
- Çevre ve iklim şartlarına karşı dayanıklı,
- Kaplama üzerindeki yüzeysel suların temele sızması için yeterince geçirimsiz olma özelliklerini sağlamalıdır (Tunç, 2007).

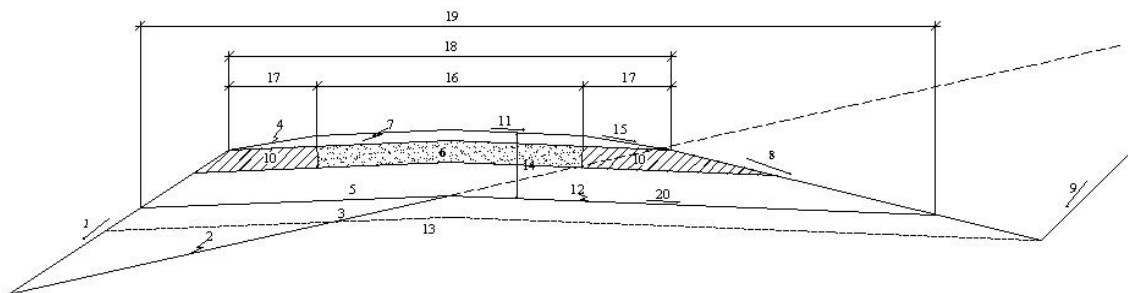
Esnek üstyapılar üretildikleri kalite bakımından 2 sınıfa ayrılır;

- Düşük standartlı kaplamalar (yüzeysel veya koruyucu tabakalar),
- Yüksek standartlı kaplamalar (bitümlü sıcak karışımlar).

Düşük standartlı kaplamalar günlük ağır taşıt trafiğinin 500 den az olduğu düşük trafik hacimli veya 8.2 ton standart dingil yükünün 20 yıldaki tekerrür sayısının 2 milyondan az olduğu yollarda yeterli performansı sağlayabildiğinden ve ekonomik olduğundan kullanılmaktadır. Yüksek standartlı karayolu ve otoyollar ise bitümlü sıcak karışımlara sahip tabakalardan yapılmaktadır.

2.1.1. Alttemel tabakası

Alttemel tabakası, tesviye yüzeyi üzerine serilen, üstteki diğer tabakalara nazaran daha az gerilmeye maruz kaldığından daha düşük kaliteli düşük elastisite modülüne veya CBR değerine sahip, fakat iyi drene olabilen ve genellikle belli bir granülometrisi olan (Çizelge 2.1) daneli granüler malzemeden inşa olunan en alt tabakadır (Şekil 2.1). Kaplamadan gelen trafik yükünün taban üzerine yayılmasında üzerinde bulunan temel tabakasına olan yardımı yanında, su ve don tesirlerine karşı tampon bölge vazifesi de gören bu tabakanın teşkili ile daha pahalı malzemeden inşa olunan temel tabakasının kalınlığı azaltılmış, böylece ekonomi sağlanmış olur. Taban zemininin durumuna göre nadir olarak bu tabakadan vazgeçilebilir (Yayla, 2009; Tunç, 2007). Alttemel tabakasında kullanılacak agrega özellikleri Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilmiştir (Çizelge 2.2).



Şekil 2.1. Esnek Üstyapı Enkesiti

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1- Dolgu Şevi | 11- Yolun Enine Eğimi |
| 2- Doğal Zemin | 12- Tesviye Yüzeyi |
| 3- Seçme Malzeme Tabakası | 13- Taban Zemini (Yol Gövdesi) |
| 4- Banket Kaplaması | 14- Üstyapı Proje Kalınlığı |
| 5- Alt Temel | 15- Banket Eğimi |
| 6- Temel Tabakası | 16- Trafik Şeritleri Genişliği |
| 7- Kaplama Tabakası | 17- Banket Genişliği |
| 8- Hendek Şevi | 18- Platform Genişliği |
| 9- Yarma Şevi | 19- Üstyapı Taban Genişliği |
| 10- Banket Temeli | 20- Taban Yüzeyinin Enine Eğimi |

Çizelge 2.1. Alttemel malzemesi gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek açıklığı		Tip-A % geçen	Tip-B % geçen
mm	inç		
75	3	100	
50	2	-	100
37.5	1 1/2	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	3/4	70 - 100	-
9.5	3/8	45 - 80	30 - 70
4.75	No.4	30 - 75	25 - 60
2.00	No.10	-	15 - 40
0.425	No.40	10 - 25	10 - 20
0.075	No.200	0 - 12	0 - 12

Çizelge 2.2. Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri (KTS, 2006)

Deney adı	Şartname limitleri	Deney standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp, Maksimum %	20	TS-3655 AASHTO T - 104
Aşınma kaybı (Los Angeles) Maksimum %	50	TS-3694 AASHTO T - 96
Likit Limit, Maksimum %	25	TS-1900 AASHTO T - 89
Plastisite İndeksi, Maksimum %	6	TS-1900 AASHTO T - 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, Maksimum %	<u>İri Malzeme</u> (4.75 mm elek üstü) 2 <u>İnce Malzeme</u> (4.75 mm elek altı) 2	ASTM C-142
Organik Madde %	1	AASHTO T-194

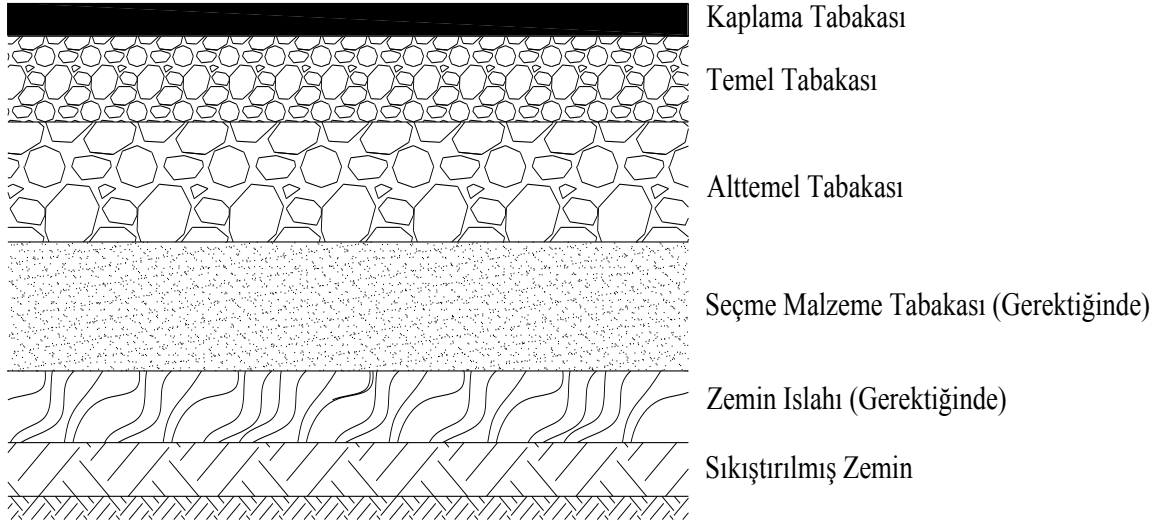
2.1.2. Temel tabakası

Yolun, alttemel ile kaplama tabakası arasına (Şekil 2.2) yerleştirilen ve malzeme granülometri ve fiziksel özellikleri (Çizelge 2.3) alttemel tabakasına göre daha iyi olan doğal kum, doğal çakıl veya kırmataş ile az miktarda bağlayıcı ince malzemeden oluşan tabakasıdır (Umar ve Açar, 1985). Eğer temel tabakasının yüksek stabiliteli olması gerekiyorsa bitüm veya çimento ile stabilize edilmelidir (Tunç, 2007).

Temel tabakası, kaplamaya ve banketlere temel teşkil etmek üzere granüler malzemelerden, bağlayıcılı ve bağlayıcısız olarak farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde yapılır. Bir veya birden fazla tabakalar halinde yapılan temel tabakaları;

- Mekanik Stabilizasyon Temel (MST)
- Plentmiks Temel (PT)
- Çimento Bağlayıcılı Stabilizasyon Temel (ÇST)
- Alttemel (AT)

olmak üzere dört farklı tipte inşa edilmektedir.



Şekil 2.2. Esnek üst yapı tabakaları

Temel tabakasında kullanılacak agregalara ait özellikler sırasıyla Çizelge 2.3, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Temel tabakasında kullanılacak kaba agrega malzemesinin fiziksel özellikleri (KTŞ, 2006)

Deney adı	Şartname limitleri	Deney standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na_2SO_4 ile kayıp, Maksimum %	15	TS 3655 AASHTO T-104
Aşınma Kaybı (Los Angeles), Maksimum %	40	TS 3694 AASHTO T-96
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, Maksimum %	(4.75 mm eleküstü) 1.0	ASTM C-142
Organik Madde, %	Bulunmayacak	AASHTO T-194
Diğer zararlı maddeler, Maksimum %	1.0	

Çizelge 2.4. Temel tabakasında kullanılacak ince agrega malzemesinin fiziksel özellikleri (KTŞ, 2006)

Deney adı	Şartname limitleri	Deney standardı
Likit Limit, Maksimum %	25	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite İndeksi, Maksimum %	6	TS 1900 AASHTO T-90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, Maksimum %	(4.75 mm elekalı) 1	ASTM C-142
Organik Madde, Maksimum % Renk Skalası	0.5 0-1	AASHTO T-194 TS 3673
Diğer Zararlı Maddeler, Maksimum %	1.0	

Çizelge 2.5. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek açıklığı		% geçen		
mm	inç	A	B	C
50	2	100		
37.5	1 1/2	80 - 100	100	
25	1	60 - 90	70 - 100	100
19	3/4	-	60 - 92	75 - 100
9.5	3/8	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4.75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0.425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0.075	No.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

2.1.3. Alttemel ve temel tabakalarının görevleri ve özellikleri

Temel veya alttemel tabakaları kaplama tabakaları altına, taban zemini olarak adlandırılan yol gövdesi üzerine yerleştirilir. Belli bir granülometriye (Çizelge 2.6) sahip olan bu tabakaların amacı, diğer tabakalara oranla daha ucuza mal edildiklerinden ve daha kalın yapılabildiklerinden, yol kaplamasına yorulma direnci, rijitlik ve yük yayma kabiliyeti kazandırmaktır (Tunç, 2007). Kaplamaya nazaran daha az fakat sıkıştırılmış zemine göre daha fazla trafik yükü ve gerilme aldıklarından dolayı,

kaplamaya göre daha düşük stabiliteye sahip fakat sıkıştırılmış zemine göre daha yüksek kaliteli ve mukavemetli olarak inşa edilmeleri gerekmektedir. Alttemel ve temel tabakalarının ana görevleri;

- Kaplamadan gelen yükleri zemine yaymak
- Deformasyonlara karşı direnç sağlamak
- Drenaj sağlamak
- Zeminin şime, büzülme gibi hacim değişikliklerine karşı koymak
- Donun zararlı etkilerini önlemek
- Üstyapı maliyetini düşürmek ve hızlandırmak
- Kaplama inşaatı için düzgün platform oluşturmak
- Uzun dönemli oturmalarda fleksibl bir yapı oluşturmaktır.

Çizelge 2.6. Temel ve alttemel tabakalarında kullanılan agrega gradasyonları (KTŞ, 2006)

Elek inç (mm)	Alttemel Tabakası	Mekanik Stabilizasyon Temel Tabakası				Plentmiks Temel Tabakası		Çimento Stabilizasyon Temel Tabakası
		A	B	C	D	Tip-I	Tip-II	
3”(75)	100	---	---	---	---	---	---	---
2”(50)	---	100	100	---	---	---	---	---
1 ½”(37.5)	85-100	80-100	85-100	---	---	100	---	100
1”(25)	---	60-90	70-95	100	100	72-100	100	72-100
¾”(19)	---	---	---	75-100	80-100	60-92	80-100	60-92
3/8”(9.5)	45-100	30-70	40-75	50-85	60-100	40-75	50-82	40-75
No.4(4.75)	25-85	25-55	30-60	35-65	50-85	30-60	35-65	30-60
No.10(2.00)	---	15-40	20-45	25-50	40-70	20-45	23-50	20-45
No.40(0.425)	7-40	8-20	10-25	12-30	20-45	8-25	12-30	8-25
No.200(0.075)	0-12	2-8	0-12	0-12	0-12	0-10	2-12	0-10

Temel ve alttemelin kendilerinden beklenen görevleri yerine getirebilmeleri için;

- Yüksek stabiliteli
- Maksimum yoğunlukta sıkışma
- Geçirgenlik için yeterince boşluğa sahip bir gradasyon, permeabil
- Yüksek CBR ve içsel sürtünme açısına sahip agrega
- Yoğun gradasyonlu agrega
- Filler miktarı az olan ve nonplastik veya çok az plastisiteli agrega
- Kübik ve köşeli şekle ve pürüzlü yüzeylere sahip fakat yassı ve ince-uzun daneler içermeyen kırmataş agrega
- Trafik yüklerine ve çevre etkilerine dayanıklı agrega
- Dona dayanıklı agrega
- İşlenebilirliği yüksek, az segregе olabilen agrega şartlarının hepsinin sağlanması gerekmektedir. Temel ve alttemel tabakalarında aranılan özellikler (Çizelge 2.7) doğrudan agregalarla ilgilidir.

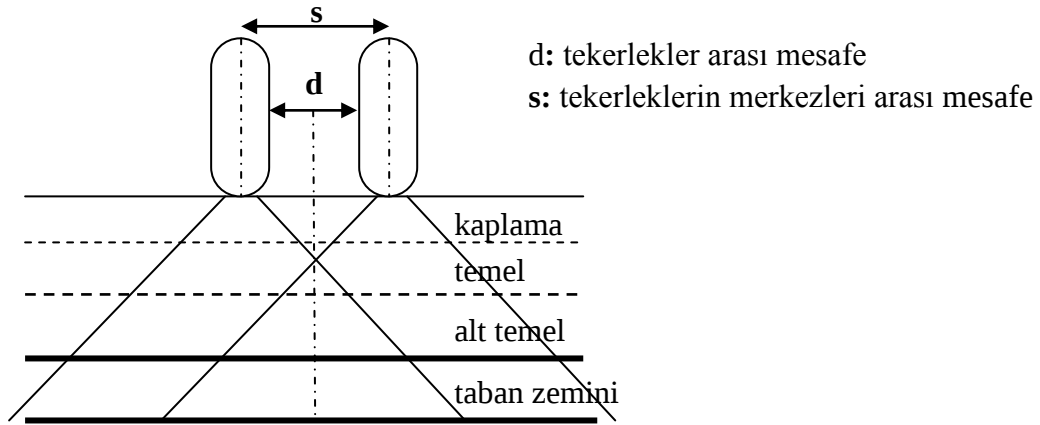
Çizelge 2.7. Alttemel ve temel tabakalarının özellikleri (KTŞ, 2006)

ÖZELLİKLER		ALTTEMEL	MEKANİK STABİLİZASYON		PLENT-MİKS TEMEL		ÇİMENTO STABİLİZASYON TEMEL	
AGREGA	Na ₂ SO ₄ ile dayanıklılık	Mak. %25	KABA Mak.%15	İNCE ---	KABA Mak.%15	İNCE ---	KABA Mak.%15	İNCE ---
	Los Angeles Aşınma	Mak. %50	Mak.%40	---	Mak.%40	---	Mak.%40	---
	Yassılık İndeksi	---	Mak.%40	---	Mak.%35	---	---	---
	LL-Pl	Mak. 25-6	---	Mak.25-6	---	Mak.25-6	---	Mak.25-6
	Kırılmışlık Oranı	---	Min.%50	---	Min.%100	---	---	---
	Filler	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az		No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az		No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	
	Kil Topakları	Mak.%1	0	Mak.%0.5	0	Mak.%0.5	0	Mak.%0.5
	Organik Maddeler	Mak.%1	0	Mak.%0.5	0	Mak.%0.5	0	Mak.%0.5
	Diğer zararlı maddeler	---	Mak.%1	Mak.%1	Mak.%1	Mak.%1	Mak.%1	Mak.%1
	Sıkışmış tabaka kalınlığı	Mak.20 cm	Mak.20 cm		Mak.20 cm		---	
SIKIŞMA	Sıkıştırma kontrolü	-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer	-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer		-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer		7 günlük Serbest Basınç Dayanımı:35-55 kg/cm ²	
	Sıkıştırma Makinakarı: Vibrasyonlu Silindir Pnömatik Silindir	Statik çizgisel yük>30 kg/cm Lastik başına yük>3.5 ton	Statik çizgisel yük>30 kg/cm Lastik başına yük>3.5 ton		Statik çizgisel yük>30 kg/cm Lastik başına yük>3.5 ton		Statik çizgisel yük>30 kg/cm Lastik başına yük>3.5 ton	
	Minimum Sıkışma	%95 Mod. Proktor %100 Sd. Proktor	%98 Mod. Proktor %95 Titreşimli Tokmak		%100 Mod. Proktor %97 Titreşimli Tokmak		%100 Mod. Proktor	
	Sıkışmada su içeriği	W _{opt} -2(Std.Proktor) W _{opt} ±2(Mod.Proktor)	W _{opt} -2(Mod.Proktor) W _{opt} ±2(Titreşimli Tok.)		W _{opt} -2(Mod.Proktor) W _{opt} ±0.5(Titreşimli Tok.)		W _{opt} ila W _{opt} +0.5	
	CBR, %	Min.30 (Yaş)	Min.100 (Yaş)		Min.120 (Yaş)		---	
Yüzey Düzgünlüğü (4m masterla)		Mak.20 mm	Mak.15 mm		Mak.15 mm		Mak.15 mm	

2.1.4. Kaplama tabakası

Trafik yüklerine doğrudan maruz kalan, esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlamak amacıyla yapılır. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası; aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde bitümlü sıcak karışımlar ile yüksek kaliteli olarak yapılmaktadır. Düşük standartlı yollarda kaplama tabakası tek kat veya çift kat sathi kaplama olarak yapılmaktadır (Tunç, 2007). Trafik yükleri nedeniyle meydana gelen çekme ve basınç gerilmelerine, çevre ve iklim koşullarının her türlü deformasyon etkisine karşı koyabilmesi için kaplama tabakasının elastisitesinin ve stabilitesinin üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek olması gerekmektedir (Umar ve Ağar, 1985). Esnek veya rijit olmak üzere iki farklı tipte inşa edilebilir. Bir kaplama tabakası genel olarak;

- Sürüş konforu ve taşıt işletme giderleri açısından düzgün ve pürüzsüz yüzeylere sahip olmalıdır,
- Trafik ve çevre etkilerine yani düşük ısı çatlağı, asfalt soyulması, agreganın cıllanması, vb. kaplama kusurlarına karşı dirençli, durabil olmalıdır,
- Sürüş emniyeti açısından alıymanda, kurbda ve dik eğimlerde yeterli sürtünme direncine sahip olmalıdır,
- Kalıcı deformasyonlara, özellikle teker izi oluklarına karşı dirençli olmalıdır,
- Kalıcı deformasyon yapmadan trafik yüklerini (Şekil 2.3) alt tabakalara yani temel, alttemel ve zemine emniyetle yayabilme yeteneğine sahip olmalıdır,
- Tekerrür eden ağır trafik yüklerine karşı yeterli yorulma mukavemetine sahip olmalıdır,
- Yüzeysel yağmur sularının temele ve zemine sızmasını önleyecek kadar geçirimsiz olmalıdır,
- Yüksek dolgulu kesimlerde uzun dönemli oturmalara uyum sağlayacak esnekliğe sahip olmalıdır,
- Ağır trafik yükleri altında geçici deformasyon yapabilecek esnekliğe ve bir o kadar da yorulma mukavemeti için gerekli rijitliğe sahip olmalıdır (Tunç, 2007).



Şekil 2.3. Üstyapı tabakalarında araç lastiğinden gelen yükün dağılımı (Karayolu Ders Notları, 2008)

2.1.4.1. Sathi (yüzeysel) kaplama

Yüzeysel kaplama, yol yüzeyine ince bir film halinde asfalt veya katran veya ikisinin karışımını sermek, sonra bunun üstünü tabaka halinde agrega ile örtmek sureti ile yapılan hem ekonomik hem de basit bir esnek kaplama şeklidir (Umar ve Ağar, 1985; Tunç, 2007). Yolun yapılacağı temel tabakası üzerine ince bir film halinde asfalt püskürtülür. Bu asfaltın üzerine belli bir gradasyona sahip (Çizelge 2.8) agrega dökülür ve bir silindir vasıtasıyla sıkıştırılır. Sıkışma bazen yolun üzerinden geçen trafik yükleri tarafından sağlanır. Bu trafik yükünün fazla olması halinde serim işlemi iki kat şeklinde imal edilebilir. Ancak bu tip kaplamalar, özellikle hava sıcaklığının fazla olduğu bölgeler ve kışın tuzlamanın yapıldığı yerlerde pek fazla bir dayanım gösteremezler. Sathi kaplama;

- Kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek,
- Trafik etkilerinin temel tabakalarına zarar vermesini engellemek,
- Yüzeysel geçirimsizliği sağlayarak temel tabakasının stabilitesini arttırmak
- Düzgün yüzeyler sağlayarak sürüş konforunu arttırmak gibi fonksiyonları yerine getirir.

Sathi kaplamalar bu fonksiyonların yanı sıra bitümlü sıcak karışımlarla karşılaştırıldığında bazı dezavantajlara da sahiptir;

- Sürüş konforu düşük, teker gürültüsü fazladır.
- Sürtünme direncinin yüksek oluşundan dolayı taşıt işletme giderleri de yüksektir.
- Zamanla gevşeyen agregalar taşıtın önündeki ya da arkasındaki diğer araçlara zarar verebilmektedir.
- Bakım ve onarım maliyetleri yüksektir.
- Kaplama çok sık aralıklarla yenilenmelidir.
- Taşıma gücü olmadığından dolayı ağır taşıt trafiği yüksek olan yollar için kullanımı uygun değildir.

Sathi kaplamalar bir temel tabakası üzerine, trafiğin yoğunluğuna bağlı olarak tek veya çift tabaka olarak yapılır. Ayrıca bitümlü tabakaların ömrünü arttırmak, yüzey geçirgenliğini azaltarak temel zeminini hava ve su etkilerinden korumak, kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek gibi nedenlerle eski beton asfalt kaplama üzerine de sathi kaplama uygulaması yapılabilir.

Sathi kaplamada kullanılacak agrega;

- Kirli, rutubetli olmamalı,
- Kırılma, cilalanma ve soyulma direnci yüksek kırmataş olmalı,
- Filler ihtiva etmemeli, yıkanmış olmalı,
- Tek boyutlu ve tek şekilli olmalıdır,
- Kübik şekilli olmalı, yassı, ince uzun daneli olmamalıdır.

Sathi kaplamanın performansına ve servis ömrüne etki eden başlıca faktörler;

- Trafik,
- Mevcut yol yüzeyi,
- Agreganın boyutu ve tipi,
- Bağlayıcı miktarı ve özellikleri,
- Çevresel etkilerdir

Tek kat sathi (yüzeysel) kaplama, granüler temel, plent-miks temel, çimento bağlayıcılı granüler temel veya benzer temeller ile asfalt kaplamalar üzerine ince bir tabaka halinde bitümlü bağlayıcı uygulama ve bunun üzerine agreganın serilip silindirlenmesi ile yapılan tek tabakalı bitümlü sathi kaplamadır. Agreganın fiziksel özellikleri (Çizelge 2.9) KTŞ’de belirlidir.

Çizelge 2.8. Tek kat sathi kaplama gradasyonları (KTŞ, 2006)

Elek Boyu	% Geçen				
	A - Tipi	Tip - 1	Tip - 2	Tip - 3	Tip - 4
25 mm (1")	100	100			
19 mm (3/4")	0 - 30	90 - 100	100		
12.5 mm (1/2")	0 - 10	0 - 30	90 - 100		
9.5 mm (3/8")		0 - 10	0 - 35	100	100
4.75 mm (No.4)	0 - 2	0 - 5	0 - 5	75 - 100	85 - 100
2.00 mm (No.10)				0 - 10	0 - 30
0.075 mm (No.200)				0 - 2	0 - 5

Çizelge 2.9. Tek kat sathi kaplamada kullanılan agrega özellikleri (KTŞ, 2006)

Deney	Şartname Limiti	Deney Standardı
Aşınma Kaybı (Los Angeles) maksimum %	30	TS 3694 (ASTM C - 131)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp, maksimum %	12	TS 3655 (ASTM C - 88)
Kırılmışlık, ağırlıkça min. % - Tip - 1, Tip - 2 için 4.75 mm elek üzerinden en az iki yüzü - Tip - 3, Tip - 4 için 2.00 mm elek üzerinde en az iki yüzü.	80 80	---- ----
Soyulma Mukavemeti minimum %	50	EK - A
Yapışma Deneyi, (Vialit Metodu ile) düşen mıcır sayısı, maksimum, (%)	12	EK- B
Yassılık İndeksi maksimum %	25	BS 812
Cilalanma Değeri, minimum	50	TS EN 1097-8
Kil Topakları ve Ufalanabilir Taneler, maksimum %	0.5	ASTM C-142

Çift kat sathi (yüzeysel) kaplama, granüler temel, plent-miks temel, çimento bağlayıcı granüler temel veya benzer temeller ile asfalt kaplamalar üzerine birbiri ardından iki kat sathi kaplama yapılmasıyla elde edilen bir bitümlü kaplama tabakasıdır. Kullanılacak agrega gradasyonları ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 2.10 ve Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2.10. Çift kat sathi kaplama gradasyonları (KTŞ, 2006)

Elek Boyu	% Geçen			
	Tip – 1		Tip – 2	
	1. Tabaka	2. Tabaka	1. Tabaka	2. Tabaka
25 mm (1")	100			
19 mm (3/4")	90 - 100		100	
12.5 mm (1/2")	0 - 30	100	90 - 100	
9.5 mm (3/8")	0 - 10	90 - 100	0 - 35	100
6.3 mm (1/4")	-	-	-	90 - 100
4.75 mm (No.4)	0 - 5	0 - 35	0 - 5	60 - 85
2.00 mm (No.10)	-	0 - 10	-	0 - 25
0.075 mm (No.200)	-	0 - 2	-	0 - 2

Çizelge 2.11. Çift kat sathi kaplamada kullanılan agrega özellikleri (KTŞ, 2006)

DENEY	ŞARTNAME LİMİTİ	DENEY STANDARDI
Aşınma Kaybı (Los Angeles) maksimum %	30	TS 3694 (ASTM C - 131)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp maksimum %	12	TS 3655 (ASTM C - 88)
Kırılmışlık, ağırlıkça min. % Tip -1 (1. ve 2. tabaka), Tip - 2 (1.tabaka) için 4.75 mm elek üzeri, en az iki yüzü Tip - 2 2. tabaka için, en az iki yüzü	80 80 80	—
Soyulma Mukavemeti minimum %	50	Kısım 403 EK - A
Yapışma Deneyi, (Vialit metodu ile) düşen mıcır sayısı (%) maksimum	12	Kısım 403 EK - B
Yassılık İndeksi Maksimum, %	25	BS 812
Cilalanma Değeri, minimum,%	50	TS EN 1097-8
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, maksimum %	0.5	ASTM C-142

2.1.4.2. Asfalt betonu kaplama

Ağır taşıt trafiği olan yollarda, otoyollarda, hava meydanlarında kullanılan asfalt betonu yollar, oranları şartnamelerle belirlenmiş agrega ve bağlayıcının kontrol altındaki koşullarda karıştırılması ile elde edilir. Asfalt betonu genel anlamı ile binder ve aşınma tabakalarını kapsar (Tunç, 2007). Binder ve aşınma tabakalarında kullanılacak agrega özellikleri Çizelge 2.12 ve Çizelge 2.13'te verilmiştir.

Asfalt betonunda kullanılan agrega kırmataş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından ibarettir (KTŞ, 2006).

Çizelge 2.12 Binder tabakası için gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek Boyu	% GEÇEN
25 mm (1")	100
19 mm (3/4")	80 - 100
12,5 mm (1/2")	58 - 80
9.5 mm (3/8")	48 - 70
4.75 mm (No. 4)	30 - 52
2.00 mm (No.10)	20 - 40
0.425 mm (No. 40)	8 - 22
0.180 mm (No. 80)	5 - 14
0.075 mm (No. 200)	2 - 7

Çizelge 2.13. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek Boyu	TİP-1	TİP-2
19 mm (3/4")	100	
12.5 mm (1/2")	83 - 100	100
9.5 mm (3/8")	70 - 90	80 - 100
4.75 mm (No. 4)	40 - 55	55 - 72
2.00 mm (No. 10)	25 - 38	36 - 53
0.425 mm (No. 40)	10 - 20	16 - 28
0.180 mm (No. 80)	6 - 15	8 - 16
0.075 mm (No. 200)	4 - 10	4 - 10

Asfalt betonunda kullanılan agrega, kaba, ince ve mineral filler olmak üzere 3 grupta hazırlanır. Kaba agrega (Çizelge 2.14); kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşur.

Çizelge 2.14. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KTŞ, 2006)

Deney	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Aşınma kaybı (Los Angeles), maksimum %	35	30	TS 3694 (ASTMC-131)
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp, maks. %	12	10	TS 3655 (ASTM C- 88)
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça, minimum %	100	100	—
Yassılık indeksi maksimum %	35	30	BS 812
Cilalanma değeri minimum %	—	50	TS EN 1097-8
Su absorpsiyonu maksimum %	2.5	2.0	TS 3526 (ASTMC-127)
Soyulma mukavemeti minimum %	50	50	EK-A
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler, maksimum %	0.5	0.5	ASTM C-142
*sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci, İndirek Çekme Mukavemeti Oranı, min.%	80	80	AASHTO T-283
* Bu deney zorunlu değildir, gerek görüldüğünde yapılır.			

Karışımında kullanılan, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşan ince agrega (Çizelge 2.15), temiz, sağlam ve dayanıklı olmalıdır.

Çizelge 2.15 İnce agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KTŞ, 2006)

Deney	Şartname Limitleri		Deney standardı
	Binder	Aşınma	
Plastisite indeksi maksimum %	2	2	TS 1900
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler, maksimum %	0.5	0.5	ASTM C-142

Organik madde miktarı, maksimum %	0-1 (Renk Skalası) (0.5)	bulunmayacak	TS 3673 (AASHTO T-194)
--------------------------------------	------------------------------	--------------	---------------------------

Taş tozu, mermer tozu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşan mineral filler (Çizelge 2.16); kil, toprak, organik ve zararlı madde içermemelidir.

Çizelge 2.16. Mineral fillerin gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek Boyu	Ağırlıkça % geçen
0.425 mm (No. 40)	100
0.075 mm (No. 200)	70 - 100

Asfalt betonu kaplamalar agrega ve bağlayıcının karıştırılma ve serilme niteliklerine göre iki grupta incelenir;

- Bitümlü sıcak karışımlar
- Bitümlü soğuk karışımlar.

Bitümlü sıcak karışımlar yaygın olarak kullanılan asfalt betonu çeşididir. Bir asfalt plentinde uygun oranlarda ve sıcak olarak karıştırılan agrega ile bağlayıcı, yola serildikten sonra yine sıcak olarak sıkıştırılır. Yüksek standartlı yolların aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Bitümlü sıcak karışımlar;

- Taşıtlar için düzgün ve pürüzsüz bir yüzey ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleri ile sürüş emniyetini sağlamalıdır.
- Trafiğin ve çevrenin aşındırıcı etkilerine karşı dirençli olmalıdır.
- Deformasyonlara karşı dirençli olmalıdır.
- Esneklikleri ile geçici deformasyonlar yapabilmelidir.
- Kalıcı deformasyon yapmadan, alt tabakalara ve zemine yükleri emniyetle intikal ettirmelidir.
- Kurplarda ve dik eğimlerde kayma dirençleri yüksek olmalıdır.
- Yüzeysel suların temele ve zemine sızmasını önlemelidir.

- Tekerrür eden ağır trafik yüklerine karşı yeterli yorulma mukavemetine sahip olmalıdır.

Bitümlü sıcak karışım tabakalarında aranılan özellikler Çizelge 2.17’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.17. Bitümlü sıcak karışım tabakalarında aranılan özellikler

Özellikler		Bitümlü temel	BİNDER		AŞINMA	
			Hafif trafik	Ağır trafik, otoyol Tırmanma şeridi	Hafif trafik	Ağır trafik, otoyol Tırmanma şeridi
AGREGA	Kırılmışlık (En az iki yüzü, ağırlıkça)	Min.%60	Min.%60	Min.%100	Min.%60	Min.%100
	Na ₂ SO ₄ ile dayanıklılık	Mak.%12	Mak.%12	Mak.%12	Mak.%10	Mak.%10
	Los Angeles Aşınma	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%30
	Yassılık	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%35	Mak.%30
	Soyulma Mukavemeti	Min.%50	Min.%50	Min.%50	Min.%50	Min.%50
	Su Absorbsiyonu	Mak.%2.5	Mak.%2.5	Mak.%2.5	Mak.%2.5	Mak.%2
	Pl	Mak.%2(ince) Mak.%4(filler)	Mak.%2(ince) Mak.%4(filler)	Mak.%2(ince) Mak.%4(filler)	Mak.%2(ince) Mak.%4(filler)	Mak.%2(ince) Mak.%4(filler)
	Cilalanma	---	---	---	Min.0.50	Min.0.50
	Organik Madde Miktarı	Mak.%0.5	Mak.%0.5	Mak.%0.5	Olmayacak	Olmayacak
SIKIŞMA	Dizayn pratik yoğunluğunun Tek değer olarak Ortalama değer	$\geq\%95$ $\geq\%97$	$\geq\%96$ $\geq\%98$		$\geq\%97$ $\geq\%98$	
	Kalınlık (h) toleransı	$\pm 0.1h$ (Tek değer)	$\pm 0.1h$ (Tek değer)		$\pm 0.1h$ (Tek değer)	
	Sıkışmış tabaka kalınlığı	$3d_{max} > h > 1.5d_{max}$	$3d_{max} > h > 1.5d_{max}$		$3d_{max} > h > 1.5d_{max}$	
Yüzey Düzgünlüğü (4m Masterla)		Mak. 10 mm	Mak. 6 mm		Mak. 6 mm	

GRADASYON	Elek İnç	(mm)	Tip-A	Tip-B	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4
	1 ½"	(37.5)	100	100							
	1"	(25)	72-100	80-100	100	100	100				
	¾"	(19)	60-90	70-90	82-100	80-100	77-100	100	100		
	½"	(12.5)	50-78	61-81	68-87	63-81	59-77	84-100	77-100	100	100
	3/8"	(9.5)	43-70	55-75	60-79	54-72	49-66	75-91	66-84	87-100	80-100
	No.4	(4.75)	30-55	42-62	46-65	40-58	34-52	57-75	46-66	66-82	55-72
	No.10	(2.00)	18-42	30-47	34-51	28-45	23-39	42-59	30-50	47-64	36-53
	No.40	(0.425)	6-21	15-26	17-29	14-25	12-22	22-35	12-28	24-36	16-28
	No.80	(0.180)	2-13	7-17	9-18	8-16	7-14	12-22	7-18	13-22	8-16
	No.200	(0.075)	0-7	1-8	2-7	2-7	2-7	4-10	4-10	4-10	4-10

Sıcak asfalt karışımlar ile yapılan aşınma, binder ve bitümlü temel gibi esnek kaplama tabakalarının kaliteleri; karışımın stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik, kayma direnci, işlenebilirlik özelliklerine bağlıdır (Tunç, 2004).

- Stabilite, asfalt kaplama karışımının etkiyen yüklerden dolayı meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyma yeteneğidir. Stabil olmayan kaplamalar, tekerlek izi ve ondülasyon oluşumları ile göze çarpmaktadır. Stabilite hem içsel sürtünmeye hem de kohezyona bağlıdır (Tunç, 2004).
- Rijitlik, sıcak asfalt karışımların yükleme süresi ve sıcaklık etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Rijitlik genel olarak, yükleme süresi, sıcaklık ve asfaltın penetrasyonu azaldıkça ve karışım yoğunluğu arttıkça artacaktır (Tunç, 2004).
- Dayanıklılık özelliği, genelde yüksek asfalt içeriği, yoğun (iyi derecelendirilmiş) agrega gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış, geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir. Asfalt miktarının artırılmasına ilişkin bir argüman da agrega danelerini saran asfalt filminin daha da kalınlaşmasıdır. Daha kalın filmler yaşlanma ve sertleşmeye karşı direncin artmasını sağlamaktadır. Diğer bir olumlu argüman ise, asfalt miktarının artması ile birbirlerine içten bağlı olan boşluk boyutlarının azalması veya karışım işlemi ile birlikte bu gözeneklerin yalıtılarak karışıma hava ve su girişinin daha da zorlaştırılmasıdır (Tunç, 2004).
- Asfalt kaplamaların esnekliği, çatlamadan eğilebilme (yani kalıcı olmayan deformasyon) ve zeminin veya temel tabakasının uzun dönemli oturma durumunda bu çökmelere uyum sağlayabilme kabiliyetidir. Esneklik genel olarak, asfalt içeriği arttıkça, relatif açık gradasyonlu karışıma sahip olundukça artış gösterir. Ancak kaplamanın esnekliği artarsa stabilitesinin azalacağı göz önünde tutulmalıdır (Tunç, 2004).
- Sıcak asfalt karışımların yorulma mukavemeti, kaplamada çatlamlar oluşmadan tekerrür eden yükler etkisinde eğilmeye (yani kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına) müsaade etme yeteneğidir. Bir başka deyişle kaplamanın sahip olduğu çekme mukavemetinin aşılmadan yani kaplamada yorulma çatlaklarının başladığı andaki trafik yüklerinin maksimum tekerrür

sayısına yorulma mukavemeti denir. Bu nedenle kaplamanın çekme mukavemeti altındaki gerilmelere karşı çatlamadan ne kadar direnç gösterebileceğinin belirlenmesi gerekir. Yorulma mukavemeti, rijitlik, gradasyon ve yoğunluk, asfalt penetrasyonu, asfalt miktarı, kaplama ve asfalt tabaka kalınlığı arttıkça, eğilme gerilmesi azaldıkça artış göstermektedir. Sıcak asfalt karışımların diğer mekanik özelliklerinde olduğu gibi kaplamaların yeterli sıkışması, yorulma mukavemetini de arttıran önemli bir özelliktir. Çünkü asfalt tabakalarının rijitliği arttıkça yorulma mukavemeti de artmaktadır (Tunç, 2004).

- Sıcak asfalt karışımlardaki geçirimsizlik, kaplamanın içine hava ve suyun nüfus etmesinin bir ölçüsüdür. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların irtibatı, kaplamanın üstünden altına kadar su, hava ve su buharının geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma ve çözünme tekrerrü arttıkça agrega parçalanması meydana gelir. Geçirimsizlik genel olarak, asfalt miktarı, agrega gradasyonunun ve karışımın yoğunluğu ve sıkıştırma arttıkça fazlalaşmaktadır. Kaplamanın geçirimsizliği asfalt karışımlardaki boşluk oranının minimum veya hiç olmaması ile sağlanır. Ancak asfalt karışımlarda agrega daneleri arasında asfalt için minimum %12 - %14 boşluk bırakılması, agrega daneleri arasındaki boşluğun bitümlü temelde %55'i, binder tabakasında ortalama %70'i ve aşınma tabakasında ise ortalama %80'i asfaltla doldurulması stabilite için gereklidir. Bitümlü temel tabakalarında boşluk oranı %5-9, binder tabakasında %4-6 ve aşınma tabakasında ise %3-5 arasında olmasının şart koşulmasının nedeni geçirimsizliği sağlamak ve yoğunluğun artması içindir. Fakat kaplama yüzeyinin geçirimsizliği arttıkça kayma direnci yani sürüş emniyetinin azalacağı göz önünde tutulmalıdır (Tunç, 2004).

- Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetli durabilmesi ve kurlarda merkezkaç kuvvetinden ötürü savrulmaması için teker ile kaplama arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade eder. Kayma direnci genel olarak, düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek agrega, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega, açık ve kaba gradasyonlu karışım ile artmaktadır. Kaplamanın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta fakat kayma direnci önemli

ölçüde azalmaktadır. Asfalt kaplamaların yüzey pürüzlülüğü veya toplam kayma direnci makro ve mikro pürüzlülüğe bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken, makro pürüzlülük ise asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir (Tunç, 2004).

- İşlenebilirlik, karışımın serim ve sıkıştırma esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik genel olarak, kaba agrega miktarı, maksimum dane boyutu, agrega yüzeyinin pürüzlülüğü ve kırılmışlığı, asfaltın viskosluğu, filler miktarı, ara boyutlu malzeme miktarı arttıkça, karışım sıcaklığı, asfalt penetrasyonu düştükçe ve kırmataş agrega kullanıldıkça azalmaktadır. İşlenebilirliği düşük olan karışımların serme ve özellikle sıkıştırma esnasında birtakım güçlükler oluşmaktadır. Hatta bu sebepten ötürü yeterli sıkışma sağlanamadığından dolayı karışımın stabilitesi azalmaktadır. Düşük işlenebilirliğe sahip olan karışımlar ile genellikle homojen olmayan kaplamalar elde edilmektedir. Bunun yanı sıra işlenebilirliği çok yüksek olan karışımlar genellikle içsel sürtünmesi az olan dere malzemesi agregalar ve yüksek penetrasyonlu asfaltlar ile üretildiklerinden dolayı stabiliteyi de düşük olmaktadır (Tunç, 2004).

Genel olarak kışın acil onarım işlerinde veya asfalt plentinin olmadığı veya ekonomik olmadığı durumlarda, az miktarda asfalt betonu karışıma ihtiyaç duyulan yerlerde bitümlü soğuk karışımlar kullanılmakla birlikte hem pahalı hem de stabilitesi düşük olduğu için yaygın olarak tercih edilmemektedir.

2.2. Rijit Üstyapı

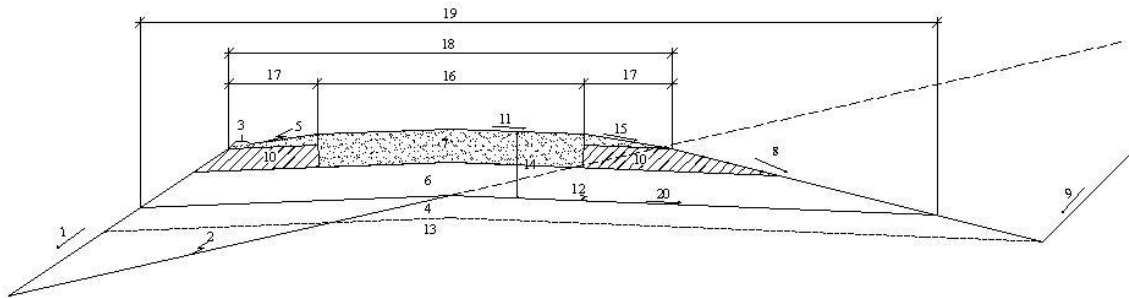
Çok yüksek trafik hacmine ve ağır trafik yüküne sahip karayollarında ve havaalanlarında taşıtlar için sürüş konforu ve sürüş emniyetini temin etmek amacıyla yapılan, üzerine gelen trafik yükünü kendi rijitliği ile taşıyan, yüksek standartlı beton kaplamalara rijit üstyapı denir. Yeterli mukavemete sahip zeminler üzerine belirli bir kalınlıkta serilen granüler alttemel tabakası ile kısmen veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelir (Şekil 2.4) (Tunç, 2007).

Beton üstyapı tipleri:

- Derzli Donatısız Beton Kaplama,
- Derzli Donatılı Beton Kaplama,
- Sürekli Donatılı Beton Kaplamadır (KTŞ, 2006).

Alttemel tabakası, beton kaplamaya zarar verebilecek donma etkisinin, topraklarda yüksek hacim değişmesi gösteren şişme ve büzülme etkisinin veya ince daneli topraklarda pompaj etkisinin olduğu durumlarda beton plak ile taban zemini veya taban zemini üzerine seçme malzeme tabakası serilmesi halinde bu tabaka ile beton plak arasına serilen daneli tabakadır (Ağar vd., 1998).

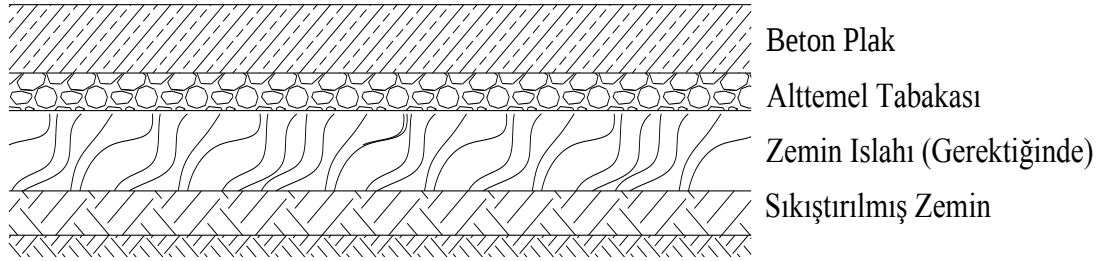
Beton plak tabakası, rijit üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan tabakasıdır. Beton plaklarda göz önüne alınması gereken en önemli iki unsur boyuna ve enine eğimdir. Beton yolların yüzeyleri kayma sakıncası göstermediği ve tutucu, pürüzlü olduğu için % 7 ye kadar boyuna eğim uygulanabilir (Ağar vd., 1998).



- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1- Dolgu Şevi | 11- Yolun Enine Eğimi |
| 2- Doğal Zemin | 12- Tesviye Yüzeyi |
| 3- Eşik | 13- Taban Zemini (Yol Gövdesi) |
| 4- Seçme Malzeme Tabakası | 14- Üstyapı Proje Kalınlığı |
| 5- Banket Kaplaması | 15- Banket Eğimi |
| 6- Alt Temel | 16- Trafik Şeritleri Genişliği |
| 7- Rijit Plak | 17- Banket Genişliği |
| 8- Hendek Şevi | 18- Platform Genişliği |
| 9- Yarma Şevi | 19- Üstyapı Taban Genişliği |
| 10- Banket Temeli | 20- Taban Yüzeyinin Enine Eğimi |

Şekil 2.4. Rijit üstyapı enkesiti (Umar ve Ağar, 1985)

Bu kaplama türünün performansı, onu oluşturan beton plaklar ve alttemel veya temel tabakalarına bağlıdır. Dolayısıyla performansa, bu tabakalarda (Şekil 2.5) kullanılan beton malzemenin özellikleri doğrudan etki eder.



Şekil 2.5. Rijit Üst Yapı Tabakaları

2.2.1. Kaplama tabakası

Kaplama betonları, diğer yapı betonlarından farklı olarak trafik ve çevre etkilerine maruz kalırlar. Bu bakımdan bu betonların imalatı özel şartlar çerçevesinde gerçekleştirilir. Normal bir kaplama betonu için bazı durumların göz önüne alınmaları şarttır. Bu beton yol, tahmin edilen trafik yükü, tekerrür sayısı gibi hususlara karşı direnç gösterebilmeli ve çekme, yorulma mukavemetlerine sahip olmalıdır. Yapılan yol, dış etkenlerin aşındırma etkilerine karşı koyabilmek için yüksek durabiliteye sahip olmalıdır. Yeterli dayanıklılığı sağlamak amacıyla beton içerisine yüksek miktarda çimento ve az miktarda su katarak su/çimento oranını düşük tutmak gerekir. Ayrıca kayma mukavemetini düşük tutmak amacıyla beton içerisindeki kum miktarı minimumda tutulmalıdır. Yeterli bir eğilme ve çekme direnci sağlamak, kullanılan agreganın yüksek kalitede olmasına bağlıdır. Serim işlemi sırasında asfalt betonundakinin aksine betonun işlenebilirliği düşük olmalıdır. Soğuk iklim koşullarında, donma ve çözünme etkilerine karşı dayanıklı olması da aranan nitelikler arasındadır.

2.2.2. Zemin ve alttemel tabakaları

Beton kaplama tabakasının, trafik yüklerinden oluşacak gerilmelere karşı dirençli olması gerektiği kadar beton kaplamanın altındaki zeminde çevre ve trafik şartlarına karşı stabil ve üniform bir davranış göstermesi şarttır. Çünkü stabil ve üniform bir desteğin amacı, çok güçlü bir destekten ziyade beton kaplamanın her noktasında sabit ve yeterli bir taban dayanımının sürekliliğini sağlamaktır. Bu nedenle taban zemini iyileştirilmeli ve kaplama tabakası ile zemin arasına yüksek granüler malzeme konulmalıdır. Kplama altına yapılacak alttemel tabakasının genel amaçları şunlardır;

- Kplama tabakası için uygun bir yüzey oluşturmak,
- Drenajı sağlamak,
- Don kabarmalarına karşı koymak,
- Zemindeki şişme ve büzölmelere karşı koymak,
- Zeminden gelecek çamurun yüzeye yapacağı pompaj etkisini önlemek.

2.2.3. Rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajları

Avantajları;

- Yüksek kalitesi göz önüne alındığında, esnek üstyapılara göre ekonomiktir.
- Mekanik özellikleri daha yüksek olduğundan daha az kalınlıkta yapılır.
- Daha uzun ömürlüdür.
- Esnek üstyapılara göre oldukça dayanıklıdır.
- Güröltüsüz ve tozsuzdur.
- Gece görüşü kolaydır.
- Yüzey geçirimsizliği esnek üstyapılara göre daha fazladır.
- Sürtünme katsayıları yüksektir.
- Zayıf zeminlerde yapılması daha uygundur.
- Bakım masrafları son derece düşüktür.
- Islak zeminlerde döküm işlemi yapılabilir.

- Çimento ülkemizde üretilbildiğinden dışarı bağımlı değildir.
- 5°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve rutubetli havalarda inşa edilebildiklerinden dolayı inşaat mevsimi daha uzundur
- Hizmet ömrü sonunda yeni kaplama tabakası için temel görevi görürler.

Dezavantajları;

- Serim işleminin akan trafik sırasında yapılması zordur.
- Dökülen beton prizini alıncaya kadar yol trafiğe açılmaz.
- Yapım maliyeti çok yüksektir.
- Tasarlama ve uygulama sırasında yapılacak hataların sonradan telafi edilmesi güçtür.
- Onarım süreleri çok uzun olduğundan ve onarım sırasında yolun trafiğe kapatılması gerektiğinden dolayı servis yollarının yapılması gerekmekte, bu da onarım maliyetini arttırmaktadır.
- Kademeli inşaaata uygun değildir
- Renklerinin esnek üstyapılara nazaran açık olması güneşli havalarda görüşü zorlaştırır.
- Daha sonradan yolda yapılacak her türlü tesisat döşeme işleri çeşitli sorunlara yol açar.
- Beton plakalar arasındaki derzlerin inşası iyi yapılmaması durumunda sürüş konforu büyük ölçüde azalır.
- Derz dolgularının onarım ihtiyacı fazla ve maliyetleri de yüksektir.
- Yolda oluşacak her türlü aşınma yolu kaygan hale getirip, bu da beraberinde kötü sonuçlar doğurabilir.
- Yolu oluşturan tabakalar aynı malzemelerden imal edildiği için, mevcut yolların iyileştirilmesi ekonomik değildir (Bilgiç ve Karacasu, 2008; Tunç, 2007).

BÖLÜM 3

KARAYOLU ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER

Karayolu üstyapısında kullanılan malzemeler genel olarak agregalar ve bağlayıcılar olmak üzere iki grupta incelenir.

3.1. Agregalar

Agrega yol yapımında kullanılan ana malzemelerden birisidir. Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Asfalt karışımlarda kullanılan agregaların gradasyonu, maksimum dane boyutu, dane şekli, porozitesi, dane yüzey dokusu gibi fiziksel özellikleri, yol kaplamalarının ömrü, stabilitesi, mukavemeti, performansı, üzerinde etkilidir (Tunç, 2004).

3.1.1. Agregaların sınıflandırılması

Agregalar kaynakları, boyutları, gradasyonları, biçimleri, yüzey yapıları, poroziteleri, yüzey alanları ve özgül ağırlıklarına göre farklı sınıflarda incelenir.

3.1.1.1. Mineralojik sınıflama

Agregalar elde edilmeleri açısından 3 grupta ele alınır.

Dere malzemesi; sahip olduğu olumsuz özelliklerden dolayı alttemel hariç yol kaplamalarında tercih edilmemektedir.

Yapay taşlar; çoğunlukla yüksek fırın cüruflarından elde edildiğinden, gevrek ve poroz olduklarından ve çok miktarda üretilmediklerinden, üretilen miktarının çimento yapımında kullanıldığından yol kaplamalarında tercih kullanılmamaktadır.

Kırmataş; kayaların kırılması ile elde edilen ve yol kaplamalarında kullanılan en ideal agrega kırmataş mineral agregalardır (Argun Tunç. Yol malzemeleri).

3.1.1.2.Boyut sınıflandırması

Agregalar şu boyutlara göre sınıflandırılır:

Kaba agregası: 4 No'lu (4.76 mm) eleğin üzerinde kalan kısım,

İnce agregası: 4 No'lu elekten geçen ve 200 No'lu (0.075mm) eleğin üzerinde kalan kısım,

Filler: 200 No'lu elekten geçen kısım.

Mineral agregası; kaba agregası, ince agregası ve mineral filleri içeren en az üç ayrı tane grubunun düzgün bir derecelenme verecek şekilde belli oranlarda karıştırılmasından oluşur (KTŞ, 2006).

3.1.1.3.Gradasyon sınıflandırması

Gradasyon agregası karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Kullanılacak agregası karışımı içindeki maksimum dane boyutu ve boyutu belli danelerin ağırlıkça oranları şartnamelerde verilen sınırlarla belirlenmiştir. Karışım içindeki maksimum dane boyutu arttıkça, işlenebilirlik ve sıkıştırma özelliği azalır, segregasyon artar, yoğunluk ve stabilite artar, kullanılacak bağlayıcı malzeme miktarı azalır. Asfalt tabakalarının kalınlıkları farklı olduğundan dolayı farklı maksimum dane boyutu ve dolayısıyla da farklı tip gradasyonlara ihtiyaç duyulur.

Esnek kaplamaların tabaka kalınlığı arttıkça kullanılacak agregasının maksimum dane boyutu da artmaktadır. Bir defada serilip sıkıştırılmış tabakanın kalınlığının karışımındaki en büyük dane çapının 1.5 katından daha az ve 3 katından daha fazla olmaması genel bir kural olarak bilinmektedir. Dolayısıyla maksimum dane boyutu kaplama kalınlığına bağlı olarak değişir (Tunç, 2007).

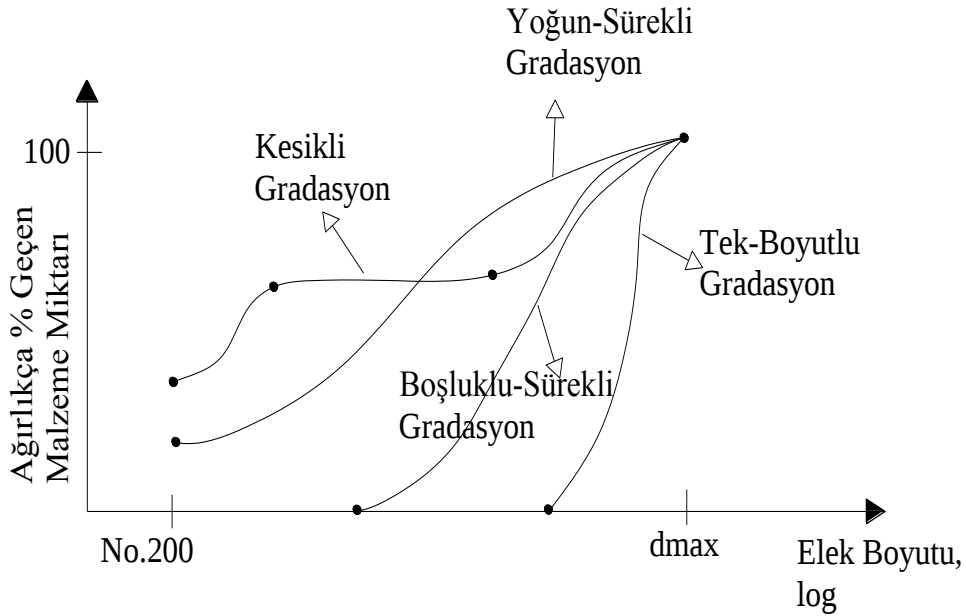
Şekil 3.1. de görülen her agregası gradasyon sınıfı farklı özelliklerinden dolayı farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

Kesikli gradasyon tipinde belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden dolayı bu boşluk miktarı fazladır. Genel olarak yol inşaatlarında pek kullanılmamakla birlikte, belirli limitler dahilinde betonda kullanılmasına izin verilmektedir (Tunç, 2004a).

Yoğun veya iyi derecelenmiş gradasyon olarak ta bilinen yoğun-sürekli gradasyon tipi minimum boşluk ihtiva edip, elek analizi grafiğinde sürekli bir eğri gösterir. İçinde en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları, aralardaki boşlukları dolduracak kadar uygun oranlarda bulunduğundan karışımın yoğunluğu artmaktadır (Tunç, 2004a).

Boşluklu-sürekli gradasyon tipinde ince agrega bulunmadığından boşluk oranı yüksektir. Bu nedenle ancak dona duyarsız tabakalarda ve düşük standartlı yolların temel tabakalarında kullanılmaktadır. Bu durumda trafik yükleri etkisi altında zamanla sıkışma beklenmelidir (Tunç, 2004a).

Hemen hemen aynı boyuta sahip agregalardan oluşan tek-boyutlu gradasyon tipi, sathi kaplama ve koruyucu örtü tabakası gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır (Tunç, 2004a).



Şekil 3.1. Agrega gradasyon tipleri (Tunç, 2004a)

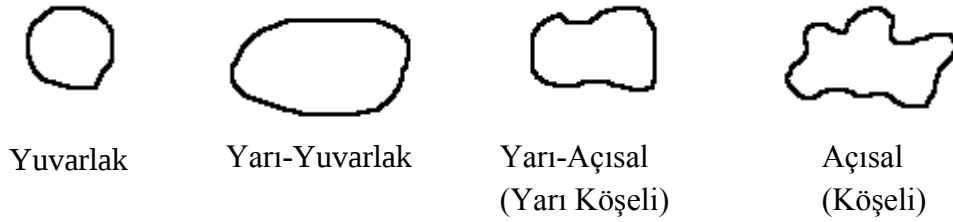
3.1.1.4. Biçim sınıflandırması

Agrega danelerinin biçimleri (Şekil 3.2), kaplamaların;

- Sıkışma direnci

- İşlenebilirlik
- Yoğunluk
- Stabilité
- İçsel kilitlenme ve içsel sürtünme açısı
- Kayma mukavemeti ve CBR özelliklerine etki ederler.

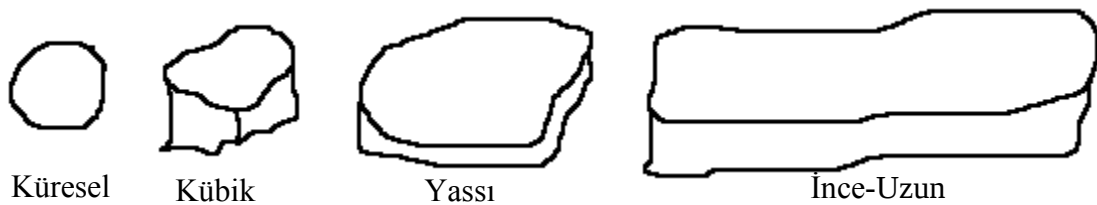
Agregalar biçim olarak 4 gruba ayrılır;



Şekil 3.2. Agregalar 2 Boyut biçim sınıflandırılması

Yuvarlak biçimli agregaların, açısal (köşeli) agregalara göre işlenebilirliği daha yüksek iken, açısal (köşeli) agregaların stabilitesi (kalıcı deformasyonlara karşı gösterilen direnç) yuvarlak agregalara göre daha üstündür (Tunç, 2007).

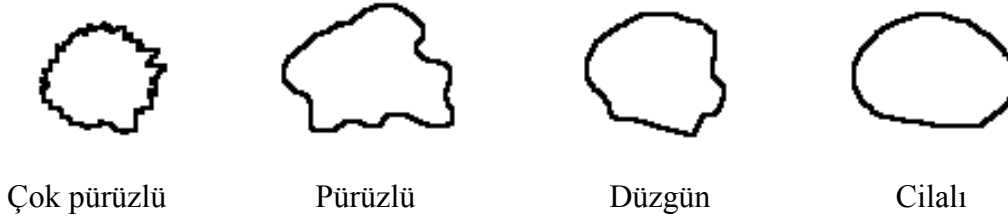
Agregaların 3 boyutlu biçim sınıflandırılması (Şekil 3.3) da 4 gruba ayrılır;



Şekil 3.3. Agregalar 3 Boyut biçim sınıflandırılması

3.1.1.5. Yüzey yapısı sınıflandırması

Agregaların yüzey yapısı (Şekil 3.4), danelerin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade etmektedir. Agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça, işlenebilirlik azalmakta, içsel sürtünme açısı ile birlikte stabilite, kayma mukavemeti ve adezyon artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün artışı aynı zamanda agreganın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve diğradasyon gibi olumsuz özellikleri de etkilemektedir (Tunç, 2004a).



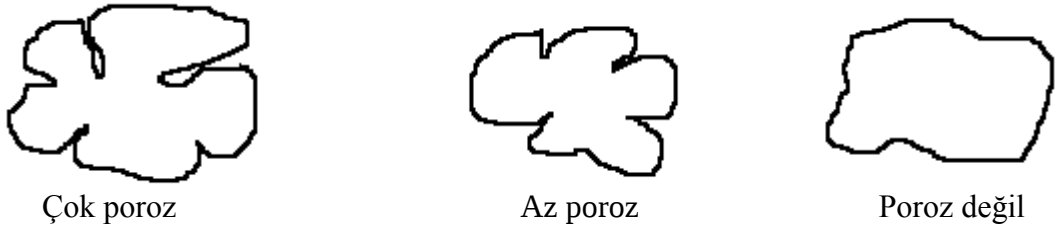
Şekil 3.4. Agregada yüzey yapısı sınıflandırılması

Betonun işlenebilirliğin artması ve su ihtiyacının azalması için cilalı yüzeylere sahip dere malzemelerinin kullanılması, fakat yüksek kayma mukavemeti, kuvvetli adezyon, yüksek kilitlenme (kenetlenme) özelliğinden ötürü bağlayıcı veya bağlayıcısız üstyapı tabakalarında ise çok pürüzlü yüzeylere sahip kırmataş agregaların kullanılması gerekmektedir (Tunç, 2007)

3.1.1.6. Porozite sınıflandırması

Agregada danelerinin porozitesi (veya su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı) belli miktarda olması gerekir (Şekil 3.5). Yeterli poroziteye sahip agregada daneleri bitümün emilmesine olanak sağlayacağından dolayı agregada ile bağlayıcı film tabakası arasında kuvvetli bir adezyon oluşturarak stabilitenin artmasına ve suyun etkisi ile film tabakasının soyulmasının azalmasına neden olmaktadır. Ancak aşırı poroz agregaların özgül ağırlıklarının az olmasından dolayı yoğunluğunun ve stabilitesinin

düşük olmasına neden olmaktadır. Ayrıca gereğinden fazla asfalt kullanımı sıcak havalarda kuma-terleme problemlerini doğurmaktadır. Bu nedenle sıcak bitümlü karışımlarda dere malzemesi, mermer, vb. poroz olmayan veya aşırı poroziteye sahip agregalar kullanılmamalıdır.



Şekil 3.5. Agregalar porozite sınıflandırılması

Porozite su emme yeteneği (yani suyu absorbe edebilmesi) ile ölçülür ve aşağıdaki denklem ile belirlenir (Tunç, 2007).

$$\% \text{ Absorbsiyon} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Burada;

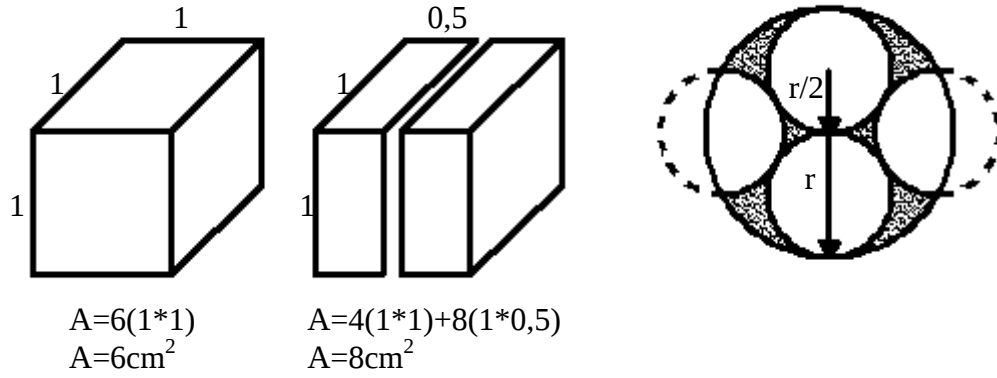
A: Agreganın fırında kurutulduktan sonraki ağırlığı

B: 24 saat su içinde bekletilen agreganın boşlukları suya doymuş fakat yüzeyi kuru-serbest su ihtiva etmeyen ağırlığı (Doymuş-Kuru Yüzey ağırlık)

Genel olarak, sıcak bitümlü karışımlarda % 0.5-2.5 ama temel tabakalarında ise don direncinin yüksek olabilmesi için sıfır porozite istenir. Agregaların poroziteleri, su absorpsiyon yeteneği ile ölçülse de agreganın asfalt absorpsiyonu daima su absorpsiyonundan çok altında olmasından dolayı absorpsiyon testi ile elde edilen miktar, asfalt absorpsiyon miktarını ifade etmeyecektir.

3.1.1.7. Yüzey alanı ve boşluk sınıflandırması

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcısız veya stabilize edilmiş (bağlayıcı) karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ile toplam boşluk hacmi gradasyon, maksimum dane çapı, dane biçimi, vb. gibi özelliklere bağlıdır. Agregatane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Dane çapı-yüzey alanı ve dane çapı-boşluk oranı ilişkisi

Toplam boşluk hacminin ve toplam yüzey alanının artması halinde gerekli bağlayıcı ihtiyacı artmakta ama toplam boşluk hacminin artması halinde karışımın yoğunluğu azalmaktadır. Bu nedenle, agreganın maksimum dane çapı arttıkça her ne kadar işlenebilirlik problemi artsa da karışımın yoğunluğunda artış olacak fakat buna karşın gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Bu nedenlerden ötürü, esnek üstyapı tabakalarında kullanılacak agregaların maksimum dane çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir. Bundan dolayı üst tabakalarda daha ince ama alt tabakalarda daha kaba gradasyonlu agregalar kullanarak karışımdan beklenen özellikler sağlanabilmektedir.

Agrega ile yapılan tüm karışımların (çimento betonu, asfalt betonu veya bağlayıcısız granüler temel tabakası, vb.) stabilitesinin yüksek olması için agrega daneleri arasındaki boşluğun minimum olması gerekir. Bunu sağlamak için agrega gradasyonu sürekli olmalıdır. Toplam yüzey alanı, Çizelge 3.1’de verilen belirli elek boyutundaki agrega yüzey alanı faktörleri ile bu elekten hacimce yüzde geçen agrega miktarlarının çarpımlarının toplamına eşittir. Bu yolla agrega karışımının toplam yüzey alanı yeter yaklaşımla bulunabilir. Eğer agrega karışımının yoğunluğu (γ) ve özgül ağırlığı (SG) bilinirse karışımın boşluk oranı aşağıdaki gibi hesaplanır (Tunç, 2004).

$$\%V = \frac{SG_{kar} - \gamma}{SG_{kar}} * 100$$

Çizelge 3.1. Yüzey alanı faktörü

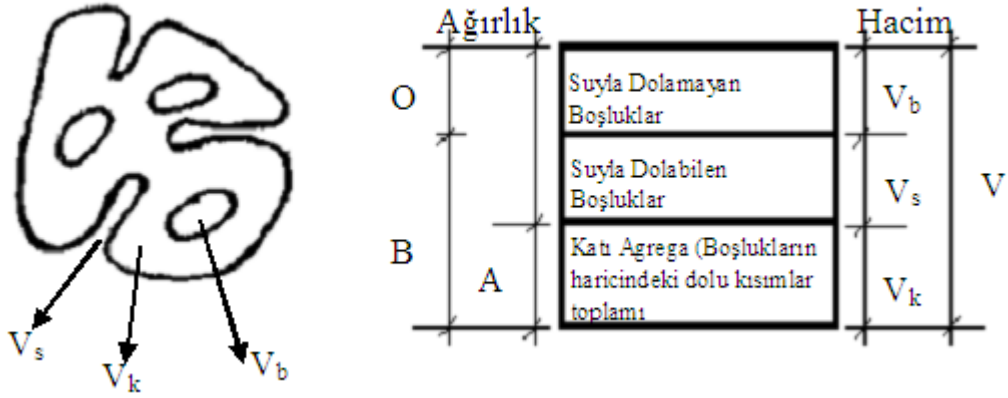
Not: % Hacimce geçen = % Ağırlıkça geçen * (SG_{kar}/SG_{agr})

Elek Boyutu	Yüzey Alanı Faktörü	
	cm ² /kg	m ² /kg
>No.4	4096	0.0041
No.4 hacimce geçen	4096	0.0041
No.8 hacimce geçen	8192	0.0082
No.16 hacimce geçen	16384	0.0164
No.30 hacimce geçen	28672	0.0287
No.50 hacimce geçen	61440	0.0614
No.100 hacimce geçen	122880	0.1229
No.200 hacimce geçen	327680	0.3277

3.1.1.8. Özgül ağırlık sınıflandırması

Karışım hesapları için agregaların özgül ağırlıklarının bilinmesi gerekir. Agregada üç tip hacim (Şekil 3.7) içerdiğinden dolayı;

- Zahiri (görünür) özgül ağırlık (SG_Z)
 - Hacim özgül ağırlığı (SG_H) veya kuru özgül ağırlık
 - Doygun-kuru yüzey özgül ağırlık (SG_{DKY})
- olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir.



Şekil 3.7. Agregada danesindeki hacim ve ağırlık ilişkisi

Agrega taneleri, su absorbe edebilen boşluklar (havayla temas halindeki boşluklar) ile su absorbe edemeyen boşluklar (havayla temas halinde olmayan katı hacminin içindeki boşluklar) içermektedir. Su absorbe edebilen boşluklar suyla dolu değilse (veya hava ile dolu olduklarında) sıfır ağırlığa sahip iken suyla dolu olduklarında ise suyun ağırlığına sahiptirler. Dolayısıyla agregada daneleri iki tip ağırlık ve üç tip hacim değerine sahiptir. Bundan dolayı agregaların sahip oldukları özgül ağırlıklar, aşağıdaki formüller ile hesaplanır (Tunç,2007).

$$SG_Z = \frac{A}{A - C} = \frac{A}{V_k + V_b} = \frac{\text{Kuru Agregat Ağırlığı}}{\text{Katı ve Geçirgen Olmayan Boşlukların Hacmi}}$$

$$SG_H = \frac{A}{B - C} = \frac{A}{V} = \frac{\text{Kuru Agregat Ağırlığı}}{\text{Katı ve Tüm Boşlukların Hacmi (Tüm Hacmi)}}$$

$$SG_{DKY} = \frac{B}{B - C} = \frac{B}{V} = \frac{\text{Doygun - Kuru Yüzey Ağırlığı}}{\text{Katı ve Tüm Boşlukların Hacmi (Tüm Hacmi)}}$$

Burada;

A: Agreganın kuru ağırlığı (Havada tartımı ile)

B: Agreganın doymun-kuru yüzey ağırlığı

C: Agreganın kuru ağırlığı (Suda tartımı ile)

Arşimed prensibine göre, bir cismin havadaki ağırlığı ile su içindeki ağırlığının farkı cismin hacmine eşittir. Dolayısıyla (A-C) agreganın hacmine eşit olacaktır.

Yukarıdaki formüllerde (B-C) > (A-C) ve B > A olduğundan dolayı daima $SG_Z > SG_{DKY} > SG_H$ ilişkisi geçerli olacaktır. Ayrıca özgül ağırlıklar arasında aşağıdaki bağıntılarda mevcuttur.

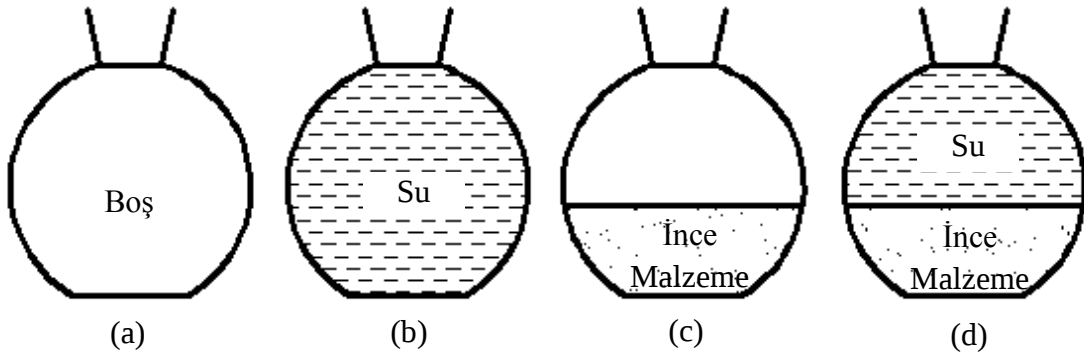
$$SG_{DKY} = SG_H (1 + \text{Absorbsiyon})$$

$$SG_Z = SG_H / [SG_H - (SG_{DKY} - 1)]$$

İnce malzemenin özgül ağırlık testi Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, yapılan tartımlar sonucunda aşağıdaki şekilde hesaplanır.

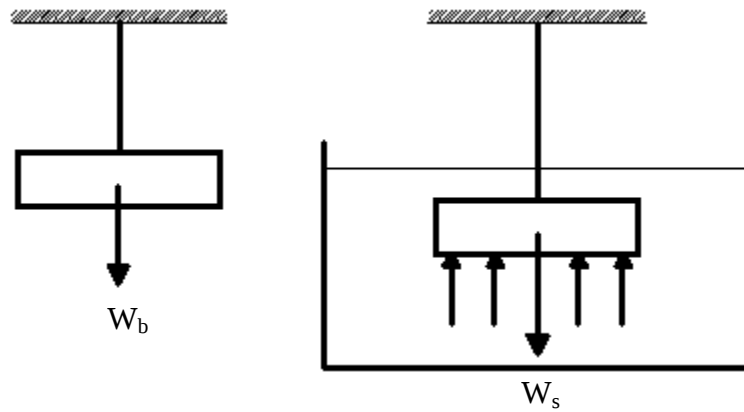
$$SG = \frac{W}{V} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} = \frac{c - a}{(c - a) - (d - b)}$$

Balon ile ince malzemenin özgül ağırlık testinde (Şekil 3.8) SG_Z bulunmuş olur. TS 3526 ile ince agregalara ait diğer özgül ağırlıklar tayin edilebilmektedir (Tunç, 2007).



Şekil 3.8. İnce malzeme özgül ağırlık testi (Balon metodu)

Kaba malzemenin özgül ağırlığının tespiti için agregâ havada tartıldıktan sonra tel bir sepet içine konarak suya daldırıp tartılır. Eğer suya daldırıldığında su absorbe etmeden hemen tartılabilirse kuru malzemenin sudaki ağırlığı bulunmuş olur. Şekil 3.9 'da görüldüğü gibi, tartılan agregânın hacmi hesaplanabilir.



Şekil 3.9. Kaba malzemenin özgül ağırlık testi

Agregâ 24 saat boyunca su içinde tutulup danelerin içindeki boşlukların tamamen suyla doymun hale geldikten sonra yüzeyindeki serbest suyun giderilmesine kadar kurutulup tartılırsa suyla doymun ağırlığı yani doymun-kuru yüzey ağırlığı elde edilir (Tunç, 2007).

3.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri

Agregaların stabilite, durabilite ve adezyon özellikleri karışımların bütün özelliklerine etki eder. Bu nedenle yol kaplamalarının performansları açısından kullanılacak agregaların fiziksel özellikleri çok önemlidir.

3.1.2.1. Stabilite

Agregaların, trafik yüklerinden veya zeminin şişme-büzülme hareketlerinden doğan hacim değişimlerinden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği dirence stabilite denir. Stabilite;

- Kayma mukavemeti
- CBR, esneklik modülü veya yatak katsayısı ile ölçülerek belirlenir (Tunç, 2007).

Temel tabakası gibi bağlayıcısız karışımlarda ve tabakalarda kayma mukavemeti agregaların içsel sürtünmeleri tarafından sağlanır. Yol kaplamalarının mukavemet ve deformasyon direncinden başlıca agregaların içsel sürtünmeleri sorumludur. Dolayısıyla agregaların en önemli fiziksel özelliği içsel sürtünme açısıdır. Agregaların içsel sürtünmeleri;

- Agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça
- Agregada danelerinin açısallığı arttıkça
- Boşluk oranı azaldıkça veya kompakte arttıkça
- Dane çapı büyüdükçe
- Yoğun-sürekli gradasyona sahip oldukça
- Agregada danelerinin minerolojik kompozisyonu homojenleştikçe
- CBR değeri arttıkça
- Agregada danelerinde yassı ve ince uzun dane miktarı azaldıkça
- Daneler arası kilitleme direnci büyüdükçe

artmaktadır. Dolayısıyla içsel sürtünme açısını etkileyen bu özellikler aynı zamanda kaplamanın stabilitesini de etkilemektedir. Bu özellikler içinde en önemlisi agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü ve açısallığı en önemlileridir. Bu nedenle yol kaplamalarında mutlaka kırmataş kullanılması gerekmektedir (Tunç, 2007).

3.1.2.2. Durabilite

Agrega danelerinin, trafik, iklim ve çevre etkileriyle oluşabilecek kırılma, aşınma ve parçalanmaya karşı gösterdiği direnç durabilite denir.

Agregalar sıkıştırma ve trafik yükleri etkisi altında kırılmaya maruz kalırlar. Bu nedenle kaplamaların üst tabakalarında kullanılacak agregaların alt tabakalarda kullanılacak agregalara nazaran daha dayanıklı olmaları gerekmektedir.

Tekerrür eden trafik yükleri altında agrega danelerinin çok küçük parçalar halinde ufalanmasına aşınma ya da degradasyon denir. Agreganın yüklerin etkisiyle degradasyona uğrarsa karışımdaki ince malzeme miktarı artarak gradasyon bozulacak ve kaplamanın dren kabiliyeti azalacaktır.

Agrega danelerinin mekanik etkilerle değil de fiziko-kimyasal etkilerle parçalanmasına disintegrasyon denir. Bu tip aşınma suyun etkisiyle, agreganın porozluğu ve minerolojik yapısıyla ilgilidir. Agreganın daneleri, bünyesine emdiği suyun donması ile meydana gelen hacim genişlemesinin getirdiği ilave gerilmeler ile, donma-çözülme periyotlarının sıklığı ile parçalanırlar. Agreganın minerolojik yapısındaki minerallerin suyun etkisiyle killi maddelere dönüşerek ufalanması ve bu killi kısımların suda çözünmesi sonucu da parçalanmalar meydana gelmektedir. Agregaların aşınması;

- Trafik yüklerinin büyüklüğü ve tekerrür sayısı
- Yer altı suyunun etkisi ile fiziko-kimyasal olaylar
- Agreganın bünyesindeki killi kısımların suda çözünmesi
- Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma periyotlarının sıklığı
- Suyun dren süresi

Sebeplerinden biri veya birkaçının bir arada etkimesi sonucu meydana gelmektedir (Tunç, 2007).

3.1.2.3. Adezyon

Agrega ile bağlayıcı arasındaki bağ kuvvetine adezyon denmektedir. Yol kaplamalarında kullanılan tüm malzemeler suyla temas halinde olduğundan, bitümle

kaplı danelerin suyun etkisiyle soyulmaması için agregaların adezyon kabiliyetinin yüksek olması gerekmektedir. Adezyon kabiliyeti;

Asfaltın karışımındaki agregaya yapışma yeteneğine adezyon denir. Yol kaplamalarının stabilitesi, asfaltın adezyonuyla yani agregada daneleri ve asfalt arasındaki bağ kuvvetiyle yakından ilgilidir. Agregada ve asfalt arasındaki adezyonu etkileyen faktörler;

- Agreganın minerolojik özellikleri
- Agreganın yüzeysel çekim kuvveti
- Agreganın porozluğu ve absorpsiyonu
- Agreganın yüzey alanı, dane şekli ve dane yüzey pürüzlülüğü
- Agreganın rutubet miktarı
- Agreganın kirliliği, içindeki taş tozu ve kil miktarı
- Asfaltın viskozluğu ve penetrasyon değeri
- Asfalt miktarı, asfalt film kalınlığı
- Karışımın gradasyonu ve boşluk oranı
- Karışım içindeki filler tipi ve miktarı
- Karışım tipi, sıcak veya soğuk karışım
- Karışım, serim ve kompaksiyon ısıları
- İklim, ısı değişimleri'dir.

Adezyonu etkileyen bu faktörler içerisinde en önemlileri, agreganın kuru, temiz ve yeterince sıcak olması ve asfaltın yeterince akışkan hale gelebileceği hale kadar ısıtılmasıdır.

3.1.3. Agregalarda aranılan özellikler

Agregada yol yapımında kullanılan 2 ana malzemeden birisidir. Dolayısıyla özellikleri kaplamalarda üstyapı performansına doğrudan etki eder. Asfalt kaplamalarda kullanılacak agregada özellikleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 Asfalt uygulamalarında agrega özellikleri (KTŞ, 2006)

Özellik		Aşınma		Binder	Bitümlü Temel	Sathi kaplama	Soğuk bitümlü karışım
		Asfalt betonu	SMA				
Kaba agrega	Aşınma kaybı maks.%	30	25	35	35	30	35
	Donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile kayıp maks%	10	8	12	12	12	12
	Kırılmışlık min.%	100		100	100	80	60
	Yassılık indeksi, maks%	30	25	35	35	25	
	Cırlanma değeri min.%	50	50	-	-	50	
	Su absorpsiyonu maks%	2	2	2.5	2.5		
	Soyulma mukavemeti min.%	50	60	50	50	50	50
	Kil topakları uflanabilir tane maks.%	0.5	0	0.5	1	0.5	2
	İndirekt çekme mukavemeti oranı min%	80		80	80		
	Yapışma deneyi maks.%					12	
İnce agrega	Plastisite indeksi maks%	2	N.P	2	2		6
	Kil topakları uflanabilir tane maks.%	0.5	0.5	0.5	1		2
	Organik madde maks%	0	0	0.5	0.5		0.5
Filler	Plastisite indeksi maks%	4	4	4	4		6
	Kil topakları uflanabilir tane maks.%	0	0	0	0		2
	Organik madde maks%	0	0	0	0		0.5

Hem ağırlıkça, hem hacimce hem de oran olarak karışımın önemli bir kısmını oluşturan agregâ, trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasıda önemli bir rol oynamaktadır. Bu yüzden yolların projelendirilmesi aşamasında, kullanılacak agregaların tiplerinin, özelliklerinin, karakteristiklerinin bilinmesi gerekmektedir (İsfalt, 2001)

Agregâ kırma taş veya kırılmış çakıl olmalı, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı tanelerden oluşmalı, içinde yumuşak ve dayanıksız parçalar, kil, organik ve diğer zararlı maddeler serbest veya agregâyı sarmış halde bulunmamalıdır (KTŞ, 2006).

Asfalt karışımlarda kullanılan agregaların gradasyonu, maksimum dane boyutu, dane şekli, porozitesi ve dane yüzey dokusu gibi özellikleri sayesinde yol kaplamalarının stabilitesi artmaktadır. Ayrıca asfalt tabakalarının daha çok gerilme alması ve trafiğin aşındırıcı etkisine maruz kalması gibi nedenlerden ötürü temel tabakasında kullanılan agregalara göre daha üstün niteliklere sahip olması gerekmektedir (Çizelge 3.3) (Tunç, 2004b).

Asfalt uygulamalarında kullanılan agregalar Çizelge3.2’de belirtilen özellikleri sağlayan kırmataş, kırma çakıl veya bunların bileşiminden hazırlanmaktadır. Ülkemizde genellikle kalkerden hazırlanan agregalar kullanılmakta olup son yıllarda, daha dayanıklı ve pürüzlü yüzeyler elde etmek amacıyla imkânlar ölçüsünde aşınma tabakasında sert kayalardan (bazalt, granit vb.) hazırlanan agregalar kullanılmaktadır.

Çizelge 3.3 Asfalt kaplama tabakalarının agregâ özellikleri (KTŞ, 2006)

Özellikler	Binder		Aşınma	
	Hafif Trafik	Ağır Trafik, Otoyol, Tırmanma Şeridi	Hafif Trafik	Ağır Trafik, Otoyol, Tırmanma Şeridi
Kırılmış (En az iki yüzü)	Min. % 60	Min. %100	Min. % 60	Min. %100
Na ₂ SO ₄ ile dayanıklılık	Mak. % 12	Mak. % 12	Mak. % 10	Mak. % 10
Los Angeles Aşınma	Mak. % 35	Mak. % 35	Mak. % 35	Mak. % 30

Yassılık	Mak. % 35	Mak. % 35	Mak. % 35	Mak. % 30
Soyulma Mukavemeti	Min. % 50	Min. % 50	Min. % 50	Min. % 50
Su Absorbsiyonu	Mak. % 2.5	Mak. % 2.5	Mak. % 2.5	Mak. % 2
PI	Mak. 2 (İnce) Mak. 4 (Filler)	Mak. 2 (İnce) Mak. 4 (Filler)	Mak. 2 (İnce) Mak. 4 (Filler)	Mak. 2 (İnce) Mak. 4 (Filler)
Cılalanma	-	-	Min.0.50	Min.0.50
Organik Madde Miktarı	Mak.% 5	Mak.% 5	Olmayacak	Olmayacak
Asfaltla dolu boşluk %	60-75		65-75	
Agrega içi boşluk min%	13		14	

3.2. Bitümlü Bağlayıcılar

Hidrokarbon ve türevlerini içeren (Çizelge 3.4), trikloroetilen içerisinde çözülebilen, uçucu olmayan, ısıtıldığında gittikçe yumuşayan viskoz bir sıvı veya katı olan bitüm, ham petrolden elde edilir. Bitüm, ham petrolden uçucu ve hafif yakıtlar rafine edildikten sonra kalan ağır petrol bileşenidir. Rengi siyah veya kahverengi olup, su geçirmeyen bir maddedir.

Çizelge 3.4 Bitümün kimyasal bileşenleri

Element	Kütle Yoğunluk %
Karbon	82 – 88
Hidrojen	8 – 11
Nitrojen	0 – 1
Sülfür	1 – 6
Oksijen	0 - 1.5

3.2.1. Bitümlü bağlayıcıların en eski kullanımı

Tarih sürecinde bitümün çok eski çağlardan beri hastalıklara ilaç, savaşlarda yakıcı madde olarak kullanıldığı görülmektedir.

Orta Doğu'da çok geniş ham petrol yataklarının oluşu, doğal sızıntılarla o bölgenin insanların önüne hazır bir şekilde sunulması sayesinde 5000 yıldan uzun bir süre bitüm, su geçirmez, yapışkan ve koruyucu özelliği sayesinde tüm su izolasyonlarını sağlamak veya yapıştırma amaçlı kullanılmıştır (Shell Bitüm El Kitabı, 2004).

M.Ö. 3000 yıllarında Sümerler tarafından yapılmış olan su deposu, günümüz modern baraj tasarımlarında da kullanılan yöntemle, doğal bitümle birleştirilmiş taşlarla bir duvardan ve duvarın içerisinde de bitümlü çekirdekten yapılmıştır. Babil kralı Nebukadnezar'ında sarayının dış duvarlarında su izolasyonunu sağlamak ve yaptığı yollarda taşları birbirine bağlamak için harç olarak bitümü kullanması M.Ö. 600 lü yıllarda bitüm kullanıldığına dair çeşitli kanıtlardır. Dünyadaki bu eski uygulamalar, bitümün ilk önce petrol birikintilerinin hazır olarak bulunduğu yerlerde kullanıldığını göstermektedir. İngiltere gibi bazı ülkelerde ise bu maddenin kullanımında çok az gelişme görülmektedir. 19.yy'ın ortalarında, Avrupa'da bulunan kaya asfaltı birikintilerinden elde edilen bağlayıcının yol kaplama malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (Shell Bitüm El Kitabı, 2004).

Önce su izolasyonu, yapıştırıcı gibi farklı amaçlarla kullanılan bitüm nihayetinde tüm dünyada yol kaplamalarının bağlayıcısı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.2.2. Asfalt tanımı ve sınıflandırılması

Rengi siyahtan koyu kahverengiye, kıvamı katıdan yarı katıya kadar değişebilen, çözücü yardımıyla sıvılaşabilen, doğal olarak veya petrolün damıtılmasıyla elde edilen bitümlü malzemeye asfalt denir. Tarihin en eski yol yapım malzemelerinden olan asfalt;

- konforludur,
- güvenlidir,
- beton gibi reaktif bir malzeme değildir,

- toplumun değişen ihtiyaçlarına hızla uyarlanabilir,
- esnektir,
- dayanıklıdır,
- her tip yol için çözümlere uygundur,
- geri dönüştürülebildiği için çevrecidir,
- sessizdir.

Asfaltlar kökenlerine, kaynaklarına göre doğal asfalt ve yapay asfalt olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar.

Gl asfaltı, kaya asfaltı gibi doğal asfaltlar, doğada minerallerle karışmış halde bulunup, kullanılabilir hale gelmesi için bir takım işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir.

Yapay asfaltlar ham petrolün damıtılmasından elde edilirler. Ham petrol, petrol kuyularından çıkarılarak ısıtma kulelerinde ısıtılır, damıtma kulelerinde ise hafif ürünler yoğun ürünlerden ayrılır. Kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin st kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılır. Kalıntı maddeler ise kulenin dibinde birikir. Asfalt ta bu kalıntı maddeler arasındadır. Bu şekilde işlemden geçmiş ham petrol beş kısma ayrılmış olur:

- Benzin (Gazolin)
- Gaz yağı (Kerosen)
- Dizel yağları (Mazot)
- Yağlama yağlar
- Ağır kalıntı maddeleri

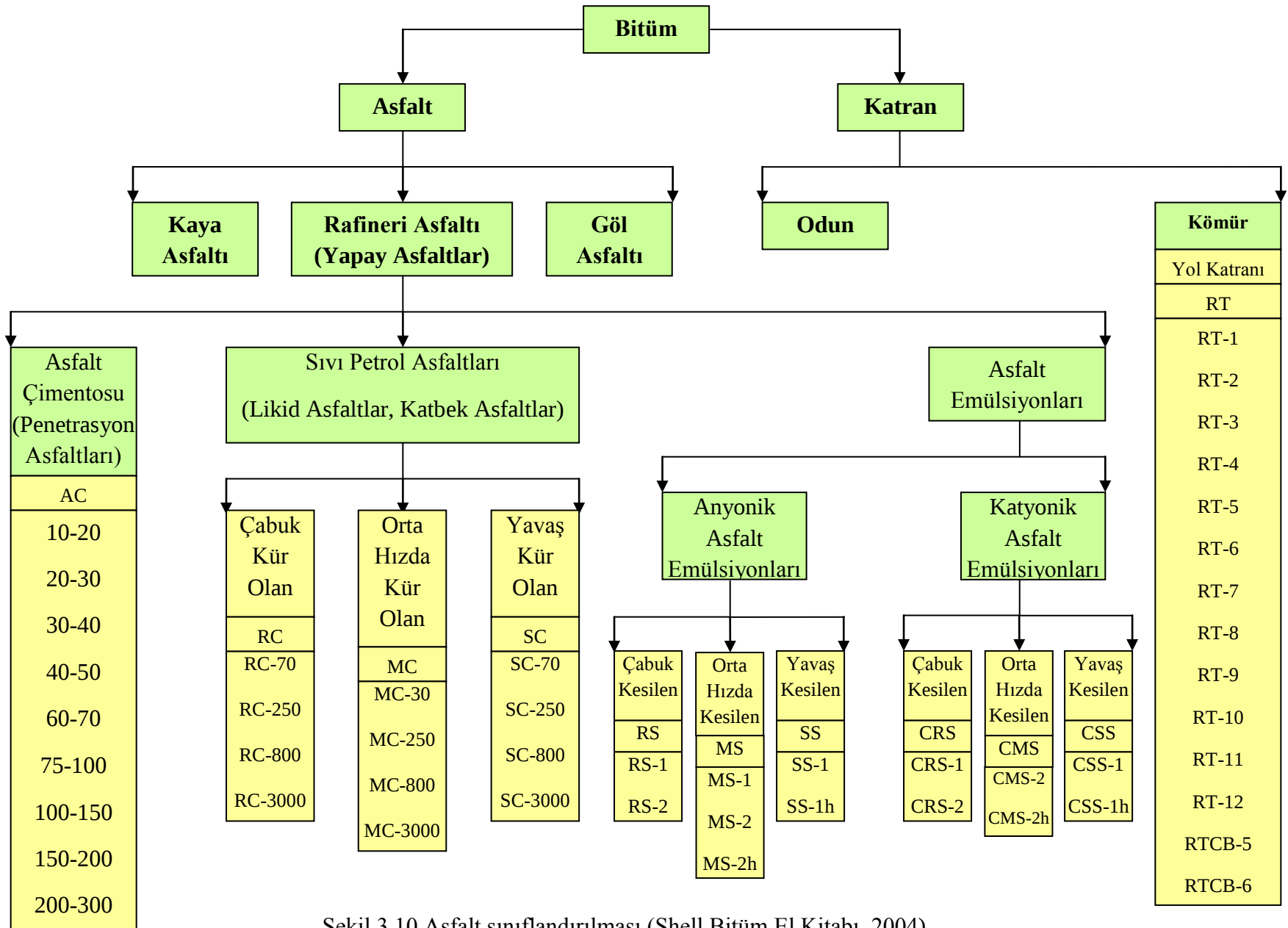
Asfalt çok karmaşık bir kimyasal yapıya sahip olduğu için (izelge 3.5) mühendislik özellikleri genellikle fiziksel özellikleri ile belirlenir.

Çizelge 3.5 Asfaltın kimyasal bileşenleri

Karbon	%82-88
Hidrojen	%8-11
Nitrojen	%0-1
Sülfür	%1-6
Oksijen	%0-1.5
Çok az miktarda metaller (oksit, tuz veya metal içeren organik bileşikler halinde)	

3.2.2.1. Asfalt çimentosu

Asfalt çimentosu, esnek kaplamalarda 40 ila 300 penetrasyon katılığına sahip bağlayıcı malzemelerdir. Doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesi ile elde edilir. Kullanılmaları için ya ısıtılarak doğrudan ya da uygun çözücü (benzin, gaz yağı veya bakiye yağ) ile karıştırılarak ya da ufak partiküller halinde parçalayıp suyla karıştırarak akıcı hale gelmesi sağlanır. Farklı penetrasyon değerine sahip bitümlerin fiziksel özellikleri (Çizelge 3.6) de farklılıklar göstermektedir (Tunç, 2004a). Bitüm sınıflandırması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Asfalt sınıflandırılması (Shell Bitüm El Kitabı, 2004)

Çizelge 3.6 Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri

Sıra No	Deney Adı		Deney Standardı	Bitüm Sınıfları				
				B 40/60	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B160/220
1	Penetrasyon (25 °C) 0.1 mm		TS 118 EN 1426	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
2	Yumuşama Noktası °C		TS 120 EN 1427	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
3	Fraass Kırılma Noktası ^a , °C	mak.	TS EN 12593	-7	-8	-10	-12	-15
4	İnci Film Halinde Isıtma Deneyi (163 °C'de, 5 saat)		TS EN 12607-2					
4.1	Kütle Değişimi %	mak.		0.5	0.5	0.8	0.8	1.0
4.2	Kalıcı Penetrasyon %	min.	TS 118 EN 1426	50	50	46	43	37
4.3	Yumuşama Noktası °C	min.	TS 120	49	48	45	41	37
4.4	Yumuşama Noktası Yükselmesi °C	mak.	EN 1427	9	9	9	10	11
5	Parlama Noktası °C	min.	TS 123 EN 22592	230	230	230	230	220
6	Çözünürlük %	min.	TS 1190 EN 12592	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
7	Parafin Mumu İçeriği ^b , %	mak.	TS EN 12606-1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
			TS EN 12606-2	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

^a Soğuk bölgelerde kullanılacak bitümlere yapılacaktır.

^b Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

3.2.2.2. Sıvı asfaltlar

Yol inşaatında astar ve yapıştırma tabakalarında ve asfalt kaplamaların rehabilitasyonunda püskürtme veya bağlayıcı olarak kullanılmak üzere uygun katkıları ile sıvılaştırılmış asfaltlardır. Sıvı asfaltın katbek ve emülsiyon olarak iki türü vardır. Sıvı asfaltların sınıflandırılması (Çizelge 3.7) kinematik viskozite ve Saybolt Furol viskozite özelliklerine göre yapılmaktadır (Tunç, 2004a).

Çizelge 3.7 Sıvı asfaltların sınıflandırılması (Tunç, 2004b)

KATBEK ASFALT	Kinematik Viskosite (60 °C)	Saybolt Furol (Φ3, 149mm, 60ml, 60 °C)
MC-30	30-60cS	15-30 san
RC,MC,SC -70	70-140cS	35-70 san
-250	250-500cS	125-250 san
-800	800-1600cS	400-800 san
-3000	3000-6000cS	1500-3000 san
EMÜLSİYON ASFALT	Saybolt Furol, (25 °C)	Saybolt Furol, (50 °C)
RS-1,MS-1,SS-1	20-100	-
RS-2	-	75-400
MS-2	Min 100	-
CRS-1	-	20-100
CRS-2	-	100-400
CMS-2	-	50-450
CSS-1	20-100	-

3.2.3. Modifiye bitümler

Bitüm yol kaplamalarında kullanılan karışımların ağırlıkca %5-6'sı olmasına rağmen yol performansı üzerinde önemli katkı sağlamaktadır. Günümüzde birçok değişik madde asfalt modifiyeri olarak kullanılmaktadır. Bu maddelerin kullanılmasının genel amacı bitümün ve bitümlü karışımların davranışlarının iyileştirilmesidir (İsfalt, 2001). Esnek kaplamaların performanslarını, stabilitesini, ömrünü arttırmak, bakım-onarım maliyeti ve gereksinimini, kalıcı deformasyonları, yorulma çatlaklarını, düşük ısı çatlaklarını, bitüm soyulması, düşük durabilite gibi başlıca kusurları azaltmak amacıyla katkı malzemesinin bitüm ya da karışım içerisine katılmasıyla modifiye bitümler elde edilmektedir. Yol kaplamalarında kullanılacak bitümün modifiye edilmesine;

- Ham petrol ve bitüm fiyatlarının artmasından,
- Yüksek maliyetler nedeniyle ince kaplamalara eğilimin artması ve bununla birlikte hizmet ömründe düşüşler görülmesinden,
- Artan nüfus ile birlikte trafik yüklerinin artmasından
- Birçok endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi için bu atıkların bitüm içinde kullanılmasının uygun olması düşüncesinden dolayı ihtiyaç duyulmuştur (İsfalt, 2001).

Karışımın özelliklerini iyileştirecek katkıların;

- Kolay ve ucuz elde edilebilmesi
- Bitüm ile homojen karışabilmesi
- Karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemesi
- Karışım ve serme sıcaklığında yeterince viskoz, sıcak iklim koşullarında kalıcı deformasyonlara karşı dayanıklı, soğuk iklim koşullarında ise aşırı rijit ve kırılgan olmaması gerekmektedir.

Katkıların bitüm içerisinde kullanılmasıyla elde edilen modifiye bitümlerin ise;

- Depolama, uygulama ve servis ömrü boyunca değişime uğramaması, özelliklerini aynen koruyabilmesi
- Mevcut ekipman ve uygulama ısıları ile kullanılabilir olması gerekmektedir.

Bitümü modifiye etmek üzere kullanılan katkılar (Çizelge 3.8) çok çeşitli olup en yaygın olarak kullanılanları aşağıdaki gibidir (Tunç, 2007).

Çizelge 3.8 Modifiye bitümler için katkı maddeleri

KATKI TİPİ	KULLANIM AMACI
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve Marshall stabilitesini arttırmak
Kauçuk (Rubber-Lastik)	Viskozluğu arttırmak
Termoplastik Polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek, viskozluğu arttırmak
Termoplastik kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek, bir miktar elastikliği arttırmak, adezyonu arttırmak
Termosetling polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu arttırmak
Organo-Manganez bileşikler	Mukavemeti arttırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini (deformasyon direnci, Marshall stabilitesi) iyileştirmek
Doğal asfaltlar (Göl ve Kaya asfaltları)	Isıya duyarlılığını düzeltmek, aşınma direncini arttırmak
Epoksi reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Gilsonit (Tabii asfalt)	Teker izi deformasyon direncini arttırmak
Siyah karbon	Asfaltın dayanımını ve karışımın deformasyon direncini arttırmak

Sülfür bitüm içerisinde iki şekilde kullanılabilir. Sülfür, az miktarda kullanıldığı karışımlarda bitümü inceltme görevi görmektedir. Fazla miktarda sülfür kullanımı, karışımın işlenebilirliğini arttırmakta, hizmet süresince deformasyona karşı dirençliliği sağlamaktadır. Sülfür düşük viskoziteli bir madde olmasından dolayı erime noktası ile yaklaşık 160°C arasındaki sıcaklıklarda karışımı kolay işlenebilir hale getirmektedir. Karışım soğuduğunda ise fazla sülfür malzeme içerisindeki boşluklara kısmen dolmakta, agrega ile bitüm arasındaki sürtünmeyi artırarak karışımın mukavemetini yükseltmektedir.

Bütün kauçuk tipleri (polibutadien, polisopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, klorofin, strene-butadien-kauçuk vb.) bitüm içerisinde kullanılmakta olup, genel olarak kullanılma amacı viskoziteyi arttırmaktır. Genellikle kullanılmış otomobil lastiklerinden elde edilen bu katkı ürünü bitümlü karışımlarda yüksek sıcaklıklarda kullanılmaktadır.

Polimer katkılar bitüm içerisinde sıklıkla denenmiş katkılardır. Polimer katkılardan polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistren ve etilen vinil asetat, ısı etkisiyle yumuşayıp, soğuyunca sertleştiklerinden dolayı termoplastik polimer adını almaktadırlar. Bu tip polimerler bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek bitümün viskozitesini arttırmaktadırlar. Uygulamada sıklıkla kullanılan polimer katkılar ise SBS, SBR, ELVALOY®, EVA, polietilen ve benzeri isimlerle anılan katkılardır. Bu katkılar kullanılarak modifiye edilen bitümlerden beklenen ise daha fazla elastik geri kazanıma, daha yüksek yumuşama noktasına, daha fazla viskoziteye, daha fazla duktiliteye ve daha iyi bağ yapma yeteneğine sahip olmalarıdır. Bütün bu istenilen özelliklerinin yanısıra polimer modifiye ediciler esnek kaplama imalatının maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadırlar. Fakat polipropilen fiberler yurdumuzda üretilen bir katkı malzemesi olup yurtdışına bağımlılığı bir anlamda ortadan kaldırmakta ve teknoloji transferi yapma gereğini bertaraf etmektedirler. Özellikle SBS bitüm modifikasyonunda kullanılmakta ancak bitüme katılması için yüksek kesme mikserlerine ihtiyaç duymakta ve dolayısıyla zaten pahalı bir imalat olan asfalt üretimini daha da özel ekipmanların kullanımıyla iyice pahalı bir hale getirmektedir.

Organo-manganez bitüm içerisinde ya tek başına ya da organo-kobalt veya organo-bakır bileşikleriyle birlikte kullanılmaktadır. Kullanıldıkları karışımın sıcaklığa karşı hassaslığını, Marshall stabilitesini, kalıcı deformasyona karşı direncini, dinamik rijitlik gibi fiziksel özelliklerini iyileştirmektedir.

Termoset polimerler 2 sıvı bileşenden meydana gelmektedir. Bitümle karıştırılan iki bileşenli epoksi reçinesi karışımları yüzeysel kaplamalarda ve yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Sıcaklık arttıkça bitüm yumuşayıp akmaya başlarken Termoset polimer katkılı karışımlar sıcaklıktan çok daha az etkilenmekte hatta yol kaplamaları üzerinde oluşan sıcaklık değişimlerinden hemen hemen hiç etkilenmemektedirler (İsfalt, 2001; Tunç, 2007).

Bitümü modifiye etmek amacıyla uygulamada sıkça başvurulanan modifiyerler çeşitli biçimlerde sınıflandırılmaktadır (Çizelge 3.9) (İsfalt, 2001). Son yıllarda polimer katkılara olan ilginin artması ile genel bir sınıflandırma ile modifiyerler, polimer ve polimer olamayan katkılar şeklinde ikiye ayrılmaktadırlar.

Çizelge 3.9 Bitüm modifikasyon tipleri

	Modifikasyon Tipleri		Örnekler
Polimer Olmayan Katkılar	Fillerler		Kil, karbon siyahı, uçucu kül
	Soyulma Önleyici Katkılar		Organik aminler ve amidler
	Ekstenderler		Ligrin, sülfür
	Anti-oksidanlar		Çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, phenolikler, aminler
	Organo-metal bileşimleri		Organo-manganez bileşimleri
	Diğerleri		Organo-karbon bileşimleri
Polimer Katkılar	Plastikler	Termoplastikler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen vinil asetat (EVA)
		Termosetler	Epoksi reçineler
	Elastomerler	Doğal kauçuklar	
		Yapay elastomerler	Sentetik- butodien kopolimer (SBR), Stran-butodianstran kopolimer (SBS), Etilen-procplendien harmoliper (EPDM), Isobüten-isopren kopolimer (IIR)
	İşlenmiş kauçuklar		
	Fiberler		Polyester fiberler, polipropen fiberler
Kimyasal Katkılar	Katkı reaksiyonu		Bitüm+monomer
	Volkanizasyon		Bitüm+sülfür
	Nitrasyon Reaksiyonu		Bitüm+nitrik asit

Bitüm modifiyerleri asfalt çimentosunun kıvamına olan etkisi yönünden de Çizelge 3.10'daki gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 3.10. Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması (İsfalt, 2001)

Tip	Özellikler	Asfalt Çimentosunun Kıvamına Olan Etkisi
1.Filler	* mineral filler * karbon siyahı * sülfür	Sertleştirme
2.Extender	* sülfür * ligrin (odun özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a) doğal lateks b) yapay lateks c) blok copolymer d) işlenmiş kauçuk	POLİMERLER * doğal kauçuk * Strene butodien, SBR * Strene butodien strene, SBS *Dönüştürülmüş kauçuk	---
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		
6. Fiber	* Doğal (Asbest, Taş yünü) *Yapay (Polipropilen, polyester, fiberglas)	Sertleştirme
7. Oksidan	* Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	* Kurşun karışımları * Karbon * Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	* Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları * Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya sertleştirme
10. Soyulma önleyici	* Aminler * Kireç	Yumuşatma

3.3. CRM-300 ve SMR-400

Ülkemizde, asfalt betonu üretiminde bağlayıcı olarak, petrol rafinerilerinden temin edilebilen 50-70 penetrasyonlu asfalt malzemesi kullanılmaktadır. TCK, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde yer alan, Kaplama sınıfı bitümler; bitümden TS 115 EN 58 standardında belirtilen esaslara uygun olarak alınan numunelere, TS 1081 EN 12591 "Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Kaplama Sınıfı Bitümler-Özellikler" standardında belirtilen deneyler uygulandığında deney sonuçları Çizelge 3.11'de verilen değerlere uygun olması beklenmektedir

Çizelge 3.11. Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı asfaltların özellikleri
(KTŞ, 2006)

Sıra No	Deney Adı	Deney Standardı		Asfalt Sınıfı
		TS EN	ASTM	B 50-70
1	Penetrasyon (25°C) 0.1 mm	TS 118 EN 1426	D 5-97	50-70
2	Yumuşama Noktası (°C)	TS 120 EN 1427	D 36-76	46-54
3	İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (163°C de, 5 saat)	TS EN 12607-2	D 1754-97	
3.1	Kütle Değişimi (%), maksimum			0.5
3.2	Kalıcı Penetrasyon (%), min.	TS 118 EN 1426		50
3.3	Yumuşama Noktası (°C), min.	TS 120 EN 1427		48
3.4	Yumuşama Noktası Yükselmesi (°C), maksimum			9
4	Parlama Noktası (°C), minimum	TS 123 EN 22592	D 92-02b	230

CRM-300 ve SMR-400 genel itibariyle ömrünü tamamlamış araç lastiklerinin yüksek basınç ve sürtünme etkisiyle öğütülmesinden elde edilmektedir (Şekil 3.11).

20 MPa değerindeki yüksek basınç ve 10-90° derecelik nisbi kayma altında vulkanize kauçuk parçalanma işleminde, CH-CH polimer zincirlerin daha az destruksiyona ve depolimerizasyona sebep olurken serbest radikallerin kaotik

oluşumuna ve bunun sonucu olarak da malzemenin reaksiyon kabiliyetinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.11. Yüksek Basınç Altında Özel Olarak Öğütülmüş Otomobil Lastiği

CRM-300 ve SMR-400 modifiye malzemesinin içinde viskoziteyi azaltmak için, poli fosforik ve orto fosforik asit, penetrasyon endeksini azaltmak için öğütülmüş EVA üretim artıkları, kauçuk yüzeyi ile bitümün malten ve asfalten bileşenlerin arasında CH-CH bağlarını çapraz bir şekilde bağlamak için Kükürt, öğütülmüş poliüretan üretim artıkları, ayrıca reaksiyon aktivatörü olarak çinko oksit bulunmaktadır.

Asfalt betonu üretiminde, ilave donanımlara ihtiyaç duyulmaksızın asfalt şantiyelerindeki plantler (Şekil 3.12) kullanılmaktadır. Ayrıca üretilen asfalt betonunun taşınması ve serilmesi aşamalarında da normal asfalt donanımları kullanılmaktadır. CRM-300 ve SMR-400 modifiye asfalt malzemeleri, KGM Teknik Şartnamesinin aşınma ve binder kaplama tabakaları için beklenen dayanım değerlerini (KTŞ,2006) sağlamaktadır. Ancak asfalt kaplamaların performans özelliklerine katkısı bununla kalmamakta, CRM-300 soğuk iklimli bölgelerde, SMR-400 ise sıcak iklimli bölgelerde büyük avantajlar sağlamaktadır.



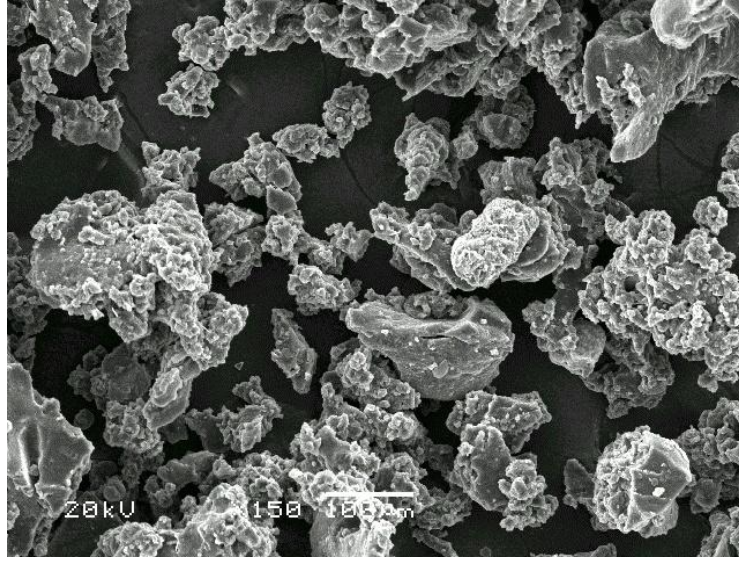
Şekil 3.12. Asfalt Plenti

Çizelge 3.12. CRM-300 SMR-400 kullanım oranları

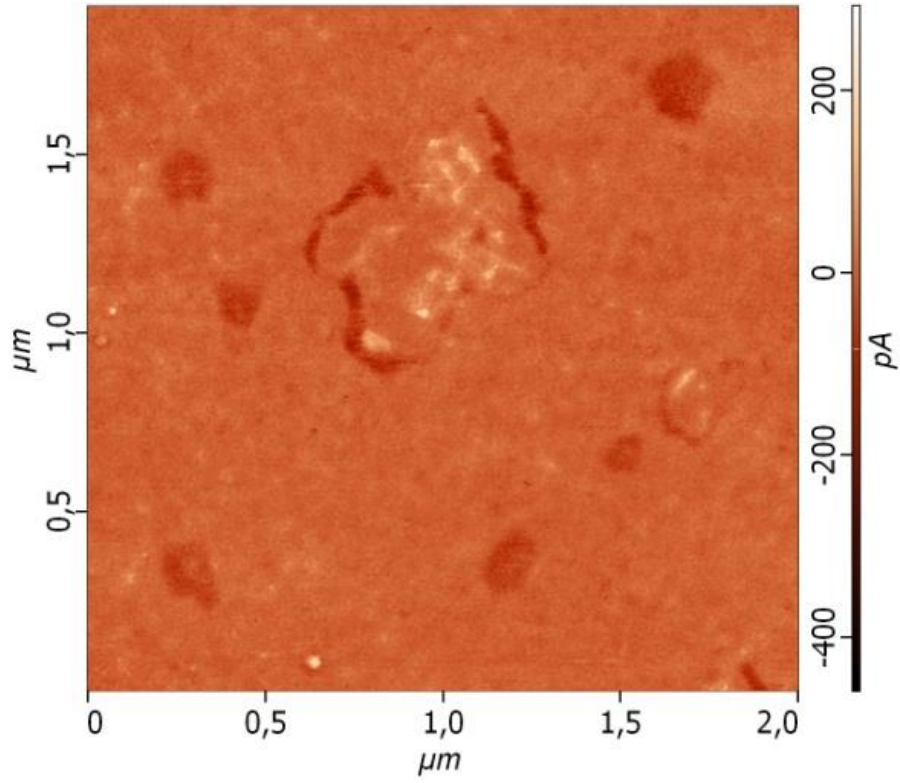
Özel Öğütülmüş Lastik Katkılı Modifiye Asfalt		
Asfalt Türü	50-70 asfalt	50-70 asfalt
Modifiye Asfalt Türü	CRM-300	SMR-400
Minimum Öğütülmüş Lastik Miktarı (Asfalt miktarının yüzdesi olarak)	% 10	% 15

Normal şartlar altında öğütülmüş lastik katkıları asfalt betonu içerisinde yüksek ısılarda şişme yaparak sıkışmayı önlerken, CRM-300 ve SMR-400 katkı malzemesi yüksek basınç altında üretiminden dolayı mısır patlağı şeklinde bir yapı kazanmakta ve gerek asfalt, gerekse karışım içerisinde homojen bir dağılım sağlamaktadır.

Asfalt modifikatorü, kuru karışıma da (bitüm hariç tüm katkı malzemelerinin ısıtılması sonrası bitüm katılmadan önceki karışım), ıslak karışıma da (sıcak bitüm) uygulanabilmektedir.



Şekil 3.13. CRM-300 katkı malzemesinin mikroskopik görüntüsü



Şekil 3.14. CRM-300 tane boyutu

3.3.1. Modifiye asfaltın hazırlanması ve depolanması

Modifiye edilecek asfalt ile modifiye edici madde olarak kullanılacak katkı malzemeleri, katkı malzemelerini üreten firmanın malzemenin karıştırılması ile ilgili üretim talimatlarına uygun olarak karıştırılmaktadır.

Modifiye edilmiş asfalt ürünü, normal asfalt ürünü ile ayrı yerlerde birbirine karıştırılmayacak şekilde depo edilebilmektedir. Modifiye edilmiş asfalt ürünü için şantiyede özel saklama koşulları gerekmemektedir. Modifiye edilmiş asfalt ürünü için normal asfalt tankları kullanılabilir. Modifiye edilmiş asfalt ürününde herhangi bir şekilde segregasyon meydana gelmediğinden, bekletilen ürünün tekrar karıştırma için herhangi bir ilave donanımına ihtiyaç bulunmamaktadır.

3.3.2. Modifiye asfaltın kullanılması

Modifiye edilmiş asfalt ürününün, asfalt beton üretimi için kullanımında şantiyede herhangi bir ilave tank, plant donanımına ihtiyaç yoktur. Ayrıca Asfalt betonunun dökümü sırasında kullanılan finişer, silindir gibi araçlar normal dökümde olduğu gibi kullanılabilir. Modifiye edilmiş asfalt ürünü kullanılarak üretilen asfalt kaplamalar, İlgili İdarenin Teknik Şartnamesi' nde belirtilen gerek aşınma gerekse binder tabakası için performans özelliklerini sağlamaktadır.

3.3.3. Modifiye asfalt betonunun taşınması ve serilmesi

Modifiye edilmiş asfalt ürünü kullanılarak üretilen asfalt betonu, normal asfalt betonlarının nakli için kullanılan taşıyıcı kamyonlar ile serim yerine taşınabilip, herhangi bir ilave kamyon donanımına ihtiyaç duyulmamakta, serim sırasında normal finişer aletleri kullanılabilir.

3.3.4. Modifiye asfaltın özellikleri

Ömrünü tamamlayarak geri dönüştürülen otomobil lastiklerine (geri dönüşümlü elastomer atıklarına) patenti alınmış diğer asfalt modifiye edici katkı maddeleri de ilave

edilerek CRM-300 ve SMR-400 isimlerini taşıyan modifiye edilmiş asfalt malzemeleri elde edilmektedir. Bu malzemelere ait deney sonuçları Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.13. Modifiye edilmiş asfalt ürünü (CRM-300)

Sıra No	Deney Adı	Deney Standardı		Modifiye Asfalt
		TS EN	ASTM	CRM-300
1	Penetrasyon (25 ⁰ C) 0.1 mm	TS 118 EN 1426	D 5-97	49.1
2	Yumuşama Noktası (°C)	TS 120 EN 1427	D 36-76	58.5
3	İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (163 ⁰ C de, 5 saat) (%)	TS EN 12607-2	D 1754-97	
3.1	Kütle Değişimi (%), mak.			0.13
3.2	Kalıcı Penetrasyon (%), min.	TS 118 EN 1426		44.5
3.3	Yumuşama Noktası Azalması (°C), min.	TS 120 EN 1427		2
3.4	Yumuşama Noktası Yükselmesi (°C), mak.			6
4	Parlama Noktası (°C), min.	TS 123 EN 22592	D 92-02b	295
5	Elastik Geri Dönüş (25 ⁰ C), (%)	TS EN 13398		13
6	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS EN 15326		1.03

Çizelge 3.14. Modifiye edilmiş asfalt ürünü (SMR-400)

Sıra No	Deney Adı	Deney Standardı		Modifiye Asfalt
		TS EN	ASTM	SMR-400
1	Penetrasyon (25 ⁰ C) 0.1 mm	TS 118 EN 1426	D 5-97	48.1
2	Yumuşama Noktası (°C)	TS 120 EN 1427	D 36-76	62

3	İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (163 ⁰ C de, 5 saat) (%)	TS EN 12607-2	D 1754-97	
3.1	Kütle Değişimi (%), mak.			0.04
3.2	Kalıcı Penetrasyon (%), min.	TS 118 EN 1426		42.5
3.3	Yumuşama Noktası Azalması (⁰ C), min.	TS 120 EN 1427		2
3.4	Yumuşama Noktası Yükselmesi (⁰ C), mak.			6
4	Parlama Noktası (⁰ C), min.	TS 123 EN 22592	D 92-02b	292
5	Elastik Geri Dönüş (25 ⁰ C), (%)	TS EN 13398		18
6	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS EN 15326		1.02

3.3.5. Modifiye asfalt tipinin seçimi

Modifiye asfaltın uygulamaya yönelik kullanımı; soğuk iklimli bölgeler için CRM-300 (%10 özel öğütülmüş lastik katkı ve patenti alınmış diğer modifiye edici maddeler), sıcak iklimli bölgeler için SMR-400 (%10 özel öğütülmüş lastik katkı ve patenti alınmış diğer modifiye edici maddeler) modifiye asfalt malzemesi olarak önerilmektedir. Her iki modifiye asfalt malzemesi de gerek aşınma, gerekse binder tabakaları için kullanılabilir.

3.3.6. Modifikatör CRM-300 ve SMR-400' ün diğer modifikatörlere göre avantajları

CRM-300 ve SMR-400 modifikatörleri birçok alanda diğer modifikatörlere göre tercih sebebi olmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Çatlak oluşumuna, tekerlek izi oluşumuna, suyun olumsuz etkilerine ve soğuk iklim şartlarına dayanımının yüksek olması, mineral katkılara yapışma özelliği bu modifikatörü diğerlerine göre daha uzun ömürlü yapmaktadır.

- Modifikatör CRM-300 ve SMR-400 ün kullanımı yol kaplamasının ömrünü %25-30 oranında arttırdığından bakım maliyetleri de aynı oranda azalmaktadır.
- Modifikatör CRM-300 ve SMR-400 kullanılması durumunda asfalt betonunun karakteristik özelliklerinin pozitif yönde değişmesi, kaplama çalışmaları ve uygulama konularında her hangi bir artı maliyet getirmemektedir.
- Başka modifikatörlere göre, CRM-300 ve SMR-400 ün taşınması ve depolaması daha uygundur.
- Mevcut parçalanma yöntemi ile elde edilen tozlar kullanılarak modifiye edilen bitümlü bağlayıcının hazırlık süresi 2 saat olmasına karşın, bu yöntem sayesinde modifiye bitümlü bağlayıcının hazırlık süresi 20 dakikaya kadar düşmektedir.
- Diğer parçalanma yöntemleri ile elde edilen parça lastik esaslı modifiye edici katkı maddelerinde gözlemlenen segregasyon ve siyah karbonun ayrılması CRM-300 ve SMR-400 modifikatörlerinde görülmemektedir,

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

4.1. Agregalara Uygulanan Deneyler

Karayolu üst yapısında kullanılacak agregaların aşınmaya, donma-çözölmeye, cilalanmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlıklarının, soyulma, su absorpsiyonu değerlerinin, dane dağılımlarının, dane şekillerinin önceden bilinmesi gerekmektedir (İsfalt, 2001). Bu amaçla bütünü temsil edecek, özenle seçilmiş agrega numunelerine çeşitli fiziksel deneyler uygulanmaktadır.

4.1.1. Elek analizi

Kullanılan Standartlar: (AASHTO T-11, T-27; ASTM C-136)

Elek analizi deneyi, bir agrega karışımının, kare gözlü standart eleklerden elenmesi yolu ile, en büyük dane çapı yönünden çeşitli agrega büyüklüklerinin sınıflara ayrılması amacıyla yapılır

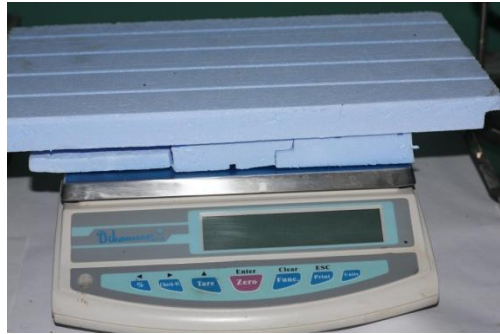
4.1.1.1. Kullanılan Aletler

Elekler: Elek analizi deneyi tek bir elek veya çeşitli nominal göz açıklığı olan elek serisi ile yapılır. Elek serisinin altında bir elek altı ve üstünde de gerekli bir kapak bulunur. 63 mm, 50 mm, 25 mm, 20 mm, 12.5 mm, 9.5 mm, 6.3 mm, 4 mm, 400 mikron, 180 mikron, 63 mikron göz açıklığı olan elekler, bitümlü malzeme için sıklıkla kullanılan eleklerdir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Elekler

Terazi: Deney numunelerini en az % 0.1 duyarlılıkla tartabilecek bir terazi (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Terazi

4.1.1.2. Deneyin yapılışı

- Agrega numunesi iyice karıştırılarak homojen duruma getirilir. Deney için gereken miktarda malzeme Çizelge 4.1’de verilen gradasyon özelliklerine uyularak hazırlanır.
- Numune 110 °C ‘ye ayarlanmış etüv de 24 saat bekletilir (değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulur) ve oda sıcaklığında kurutulup tartılır (W_o).

Etüv: Yeterli büyüklükte ve 110 ± 5 °C’ye ayarlanabilir bir etüv (Şekil 4.3)



Şekil 4.3 Etüv

- Elekler, göz açıklıkları giderek küçülecek şekilde yukarıdan aşağıya doğru sıralanır ve elek sarsma makinesine yerleştirilir.
- Numune en üstteki eleğin içine konur ve elek sarsma makinesi çalıştırılıp eleme işlemine başlanır. Bu işlem sarsma makinesi ile yapılabileceği gibi elle de yapılabilir. Eleme işlemi her bir elek için yaklaşık 2 dakika uygulanır.
- Eleme süresinin yeterli olduğu, herhangi bir elekte yaklaşık 2 dakikalık sarsma süresinde elekten geçen malzeme miktarlarının, elek üstünde kalan malzeme miktarlarının %1' inden daha az olması ile anlaşılır.
- Yeterince sürdürülen eleme işlemi sonunda her bir elekte kalan malzeme 0.1 gram hassasiyetteki terazi ile tartılır (W_u) (Özen, 2005).

4.1.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Elek analizi deneyi sonunda her elek üstünde kalan malzeme oranı, bütün deney numunesinin ağırlığının yüzdesi olarak;

$$S_u = \frac{W_u}{W_o} \times 100 (\%)$$

formülü ile hesaplanır.

Bu formülde;

S_u : Herhangi bir göz açıklığında, elek üstünde kalan malzeme oranı (%)

W_u : Herhangi bir göz açıklıklı elekte kalan malzeme ağırlığı (gr)

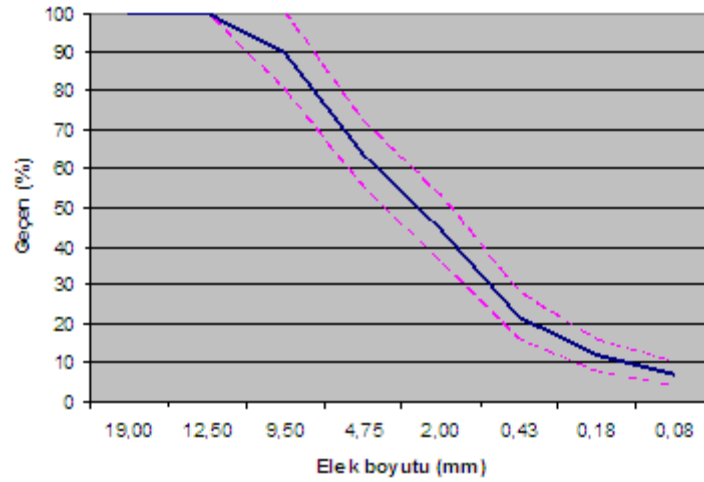
W_o : Deney numunesinin ağırlığı (gr) ‘dır.

Laboratuar çalışması için hazırlanan karışımlarda, Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen “Aşınma Tip-2” gradasyonu kullanılmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Aşınma Tip-2 için gradasyon limitleri (KTŞ, 2006)

Elek Boyutu (mm)	Şartname Alt Sınırı	Şartname Üst Sınırı	% Geçen	% Kalan	Ağırlık (gr)
12.5	100	100	0	0	
9.5	80	100	90	10	110
4.75	55	72	63.5	26.5	291.5
2.00	36	53	44.5	19	209
0.425	16	28	22	22.5	247.5
0.180	8	16	12	10	110
0.075	4	10	7	5	55
0.075 Altı				7	77

Aşınma Tip-2 gradasyonuna ait granülometre eğrisi Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Aşınma tip-2 granülometre eğrisi

4.1.2. Los Angeles (Aşınmaya dayanıklılık ve aşınma kaybı deneyi)

Kullanılan Standartlar: (ASTM C131-55; AASHTO T-96)

Los Angeles (Aşınmaya Dayanıklılık ve Aşınma Kaybı) Deneyi doğal ve yapay agregaların durabilitesini yani aşınmaya karşı dayanıklılığını belirlemek için yapılmaktadır. Yol kaplamalarında kullanılacak agregalar sıkıştırma esnasında ve trafik yükleri etkisi altında kırılmaya ve aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Aksi durumda, agregaların sıkıştırma ve trafik yükleri etkisi altında dayanıklı olmaması durumunda, kırılmalar meydana gelip ince agrega miktarı artmakta bu da dren kabiliyetini ve don direncini azaltmaktadır. Kaba agregaların aşınması, aşındırıcı bir yük kullanarak Los Angeles aşınma makinesiyle tayin edilmektedir.

4.1.2.1. Kullanılan aletler

Aşındırma bilyeleri: 390-450 gr ağırlığında dökme demir veya çelikten yapılmış, çapı yaklaşık 4.8 cm olan 12 adet bilye

Los Angeles Aşınma Makinesi: Bu deneyde kullanılan alet (Şekil 4.5) 71.1 cm. çapında ve 50.8 cm. uzunluğunda, çelik saçtan yapılmış yatay ekseni etrafında dakikada 30-35 devir yapmak suretiyle döneabilen, bir silindirden ibarettir. Silindir içinde fonttan yapılmış muhtelif adet küresel bilyeler (Dökme demir veya çelikten yapılmış, yaklaşık

4.8 cm çapında, her birinin ağırlığı 390-450 gram arasında olan 12 adet bilyedir) bulunmaktadır.

4.1.2.2. Deneyin yapılışı

- Los Angeles deneyinde kullanılacak deney numunesi, tane sınıflarına bağlı olmak üzere A, B, C, D, E, F, G tipi olarak adlandırılır. Deney için gerekli deney numunesi tiplerinin oluşum şekilleri ve miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir.
- Agreg a numunesi yıkanarak elenir ve dane dağılımı belirlenir, etüvde kurutulur.
- Granülometrik sınıfı belirlenen (Çizelge 4.2) numunenin aşındırma yükü, yani kaç küre kullanılması gerektiği tespit edilir (Çizelge 4.3).
- Etüv kurusu haline getirilmiş her dane sınıfı (W_1) tambur içine, önceden sayısı belirlenmiş bilyelerle birlikte konulup kapağı sıkıca kapatılır.



Şekil 4.5 Bilyeli Tambur

- Hızı dakikada 30-35 dönüş olacak şekilde 100 dönüş yaptırılır, deney numunesi dışarıya alınarak 1.4 mm.lik elekten elenir. Elek üstünde kalan agreg a tartılır (W_2) Elek üstünde kalan ve elekten geçen agreg alar ve bilyeler tekrar tambura konularak A,

B, C, D tipi numunelerde ilk 100 dönüş ek olarak 400 dönüş E, F, G tipi numunelerde ise ilk 100 dönüş ek olarak 900 dönüş daha yaptırılır.

- Aşındırılmış deney numunesi dışarıya alınır, 1.4 mm.lik elekten elenir, elek üstü malzeme tartılır (W_3) (Özen, 2005).

Çizelge 4.2 Numune tipleri ve miktarları

Tane Sınıfı (mm)	Deney Numunesi ve Miktarı (gr)						
	A	B	C	D	E	F	G
90.0 – 63.0					2500		
63.0 – 45.0					2500		
45.0 – 31.5					5000		
31.5 – 22.4	1250					5000	
22.4 – 16.0	1250					5000	
16.0 – 11.2	1250	2500					5000
11.2 – 8.0	1250	2500					5000
8.0 – 5.6			2500				
5.6 – 4.0			2500				
4.0 - 2.0				5000			
Toplam Tolerans	5000± 10	5000± 10	5000± 10	5000± 10	10000± 100	10000± 75	10000± 50

Çizelge 4.3 Aşınma deneyi numune tiplerine göre kullanılacak bilye özellikleri

Numune Tipi	Bilye Sayısı	Bilye Ağırlıkları Toplamı
A	12	5000+25
B	11	4575+25
C	8	3325+20
D	6	2500+15
E	12	5000+25
F	12	5000+25
G	12	5000+25

4.1.2.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Kullanılan agreganın aşınma direnci, agreganın 100 ve 500-1000 dönüş sonunda 1.4 mm elekten geçen kısmının, ilk numune ağırlığına oranı aşınma olarak, aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır

$$a_1 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 (\%)$$

$$a_2 = \frac{W_1 - W_3}{W_1} * 100 (\%)$$

Formülde;

W_1 = Numunenin etüvde kuruduktan sonraki ağırlığı

W_2 = Numunenin 100 dönüş sonu aşınmayan kısmı

W_3 = Numunenin 500 (veya 1000) dönüş sonu aşınmayan kısmının ağırlığı

a_1 = 100 dönüş sonunda aşınma oranı

a_2 = A, B, C, D tipi numunelerde 500, E, F, G tipi numunelerde 1000 dönüş sonunda aşınma oranı

Çalışmada dane sınıfı tipine uygun olarak hazırlanan 5000 gr numuneye aşınma kaybı deneyi uygulandığında aşağıdaki sonuç (Çizelge 4.4) elde edilmiştir

Çizelge 4.4 Los Angeles deney sonucu

Başlangıç Miktarı(gr)	A	5000
1.6 mm elek üstü miktar(gr)	B	3554.4
Aşınma miktarı		28.912

4.1.3. İri agregat için özgül ağırlık ve su emme deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS-3526, ASTM C 127-59)

Bu deney iri agregaların (4.75 mm elek üzerinde kalan agregaların) özgül ağırlık ve su emme oranını tayin etmek amacıyla yapılmaktadır.

4.1.3.1. Kullanılan Aletler

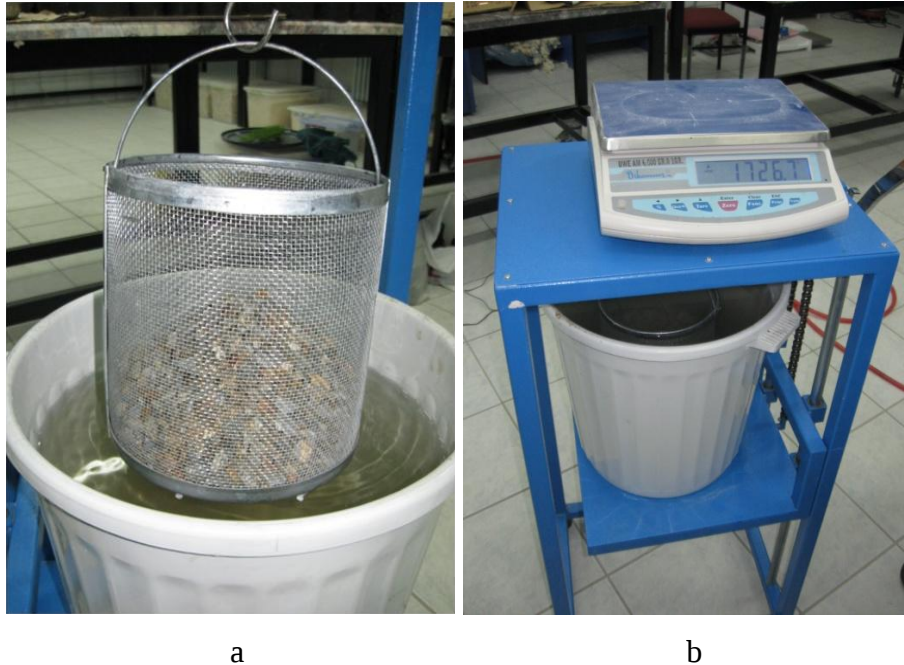
Terazi: 20 kg çekerli, 1 gr duyarlı ve su içinde de tartım yapabilen bir terazi.

Kova: Tel sepeti içine alabilecek büyüklükte bir kova.(Şekil 4.6.a)

Özgül ağırlık sehpa: Su içinde tartım yapmayı sağlayan alet (Şekil 4.6.b)

Kafes örgülü sepet: 4 mm göz açıklı elek telinden yapılmış bir sepet ve sepeti terazi kefesine bağlama düzeni

Kurutma bezleri: Havlu veya benzeri malzemedan yapılmış bezler.



Şekil 4.6 Kafes örgülü sepet (a) ve özgül ağırlık sehpa (b)

4.1.3.2. Deneğin yapılışı

- Deneğ numunesi, içinde yaklaşık 20°C’de su bulunan bir kap içine konur ve 24 saat bekletildikten sonra çıkarılır, süzölür ve kurutulur. Bu sırada aşırı buharlaşmamaya da dikkat edilmelidir.
- Doygun kuru yüzey halindeki numune tartıdan hemen sonra kafes örgölü tel sepete konarak su dolu kovanın içine, su yüzeyinden en az 5 cm daha aşağıda kalacak şekilde daldırılır.
- Su yüzüne çıkarılmadan kovanın içinde en az 10 kez sertçe kaldırılıp indirilerek sağa sola sallanarak taneler arasında kalabilecek hava kabarcıkları çıkarılır.
- Daha sonra sepetin kova kenarına dokunmamasına dikkat edilerek özel düzenle terazi kefesinin ortasına yerleştirilir.
- Doygun malzemenin sudaki ağırlığı bulunur.
- Numune sudan çıkarılır ve etöv kurusu durumuna getirilir.
- Oda sıcaklığına kadar soğutulur ve havadaki kuru ağırlığı kaydedilir (Özen, 2005).

4.1.3.3. Deneğ sonuçlarının hesaplanması

İri agreganın özgül ağırlığı ve su emme oranı aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Yaş hacim özgül ağırlık} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Su absorpsiyon} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Bu formülde;

A: Kuru numunenin havadaki ağırlığı (gr)

B: Numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı (gr)

C: Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

İri agreganın özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 İri agreganın özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları

Kuru numunenin havadaki ağırlığı	A	2000
Numunenin yüzeyi kuru suya doymun ağırlığı	B	2004.5
Numunenin sudaki ağırlığı	C	1241.1
Hacim Özgül Ağırlık		2.620
Zahiri Özgül Ağırlık		2.635
YKSD Özgül Ağırlık		2.626
Su absorpsiyonu(%)		0.225

4.1.4. İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 3526; ASTM C 127-59)

Agregaların kuru özgül ağırlığı, doymun kuru yüzey özgül ağırlığı ve görünen özgül ağırlığı ince ve iri agregalara ayrı ayrı uygulanan deneylerle tayin edilmektedir.

4.1.4.1. Kullanılan aletler

Terazi: 0.1 g hassasiyetinde bir terazi

Tablali ısıtıcı veya hava üfleli ısıtıcı: Deney numunesinin yakın çevresini, $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ çıkarabilecek güçte gazla, elektrikle veya hava üfleyerek ısıtmaktadır.

Ölçü kabı: 500 veya 1000 ml lik cam bir ölçü kabı kullanılmaktadır.

Cam levha: Cam levha, ölçü kabının üstünü kapatmak için kullanılmaktadır.

Metal kalıp: Üst iç çapı 38 mm, alt iç çapı 89 mm, yüksekliği 73 mm olan kesik koni biçimli metal bir kalıptır.

Sıkıştırma çubuğu: Yaklaşık 25 mm çapında, ucu yuvarlatılmamış, yaklaşık 350 gr ağırlığında, prinçten yapılmış bir çubuktur.

Bezler: Havlu veya benzeri kurutma bezleri,

Termometre: 1 °C bölüntülü

4.1.4.2. Deneyin yapılışı

- Deney numunesi tartılır (f).
- Deney numunesi su içerisinde 24 saat bekletildikten sonra ince taneleri kaybolmayacak şekilde suyu süzülerek akıtılır ve bir tava içine yayılır.
- Tava, tablalı ısıtıcısı üzerine konarak kurutulur.
- Numunenin çok kurumamasına özen gösterilmelidir.
- Doygun kuru yüzey durumuna getirilmiş olan numune tartılır ve doymuş kuru yüzey ağırlığı kaydedilir (e).
- Etüv kurusu durumuna getirilir.
- Bir desikatöre konarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur.
- Cam ölçü kabı (Piknometre) tartılır (a).
- Soğumuş numune cam ölçü kabına doldurulur birlikte tartılır (c).
- Ölçü kabının daha önce saptanmış olan ağırlığı bu tartıdan çıkarılarak numunenin kuru ağırlığı belirlenir.
- Ölçü kabı yaklaşık 20 °C' deki su ile yarıya kadar doldurulur ve düz bir yüzey üzerinde hafif hafif vurularak ve aynı zamanda döndürülerek hava kabarcıklarının çıkması sağlanır.
- Bir saat beklendikten sonra ölçü kabı yaklaşık 20 °C' deki su ile 500 ml (veya 1000 ml) işaret çizgisine kadar doldurulur ve tartılır (d), (Şekil 4.7).
- Bu ağırlıktan numune kuru ağırlığı çıkarılarak cam ölçü kabı + su ağırlığı bulunur (b) (Özen, 2005).



Şekil 4.7 İnce agreganın özgül ağırlığının bulunması

4.1.4.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

İnce agreganın özgül ağırlığı ve su emme oranı sırası ile aşağıdaki formüller ile yüzde bir hanesine yuvarlatılarak hesaplanır (Özen, 2005). Sonuçlar Çizelge 4.6 da verilmiştir.

$$\text{Su emme oranı} = \frac{e - f}{f} \times 100$$

Bu formülde;

a: Piknometre boş ağırlığı (gr)

b: Piknometrenin su ile dolu ağırlığı (gr)

c: Piknometrenin numune ile dolu ağırlığı (gr)

d: Piknometrenin su ve numune ile dolu ağırlığı (gr)

e : Numunenin doymuş kuru yüzey durumundaki ağırlığı (gr)

f : Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr)

Çizelge 4.6 İnce agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Piknometre boş ağırlığı	a	120.5
Piknometrenin su ile dolu ağırlığı	b	1305.3
Piknometrenin numune ile dolu ağırlığı	c	625.7
Piknometrenin su ve numune ile dolu ağırlığı	d	1619.8
Numunenin doymuş kuru yüzey durumundaki ağırlığı	e	500
Hacim Özgül Ağırlık		2.622
Zahiri Özgül Ağırlık		2.695
YKSD Özgül Ağırlık		2.649
Su absorpsiyonu(%)		1.040

4.1.5. Filler için Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi

Fillerin özgül ağırlığı, ince agreganın özgül ağırlığını tayin etmek üzere kullanılan aletlerle ve yöntem ile belirlenmektedir (Özen, 2005).. Bu sebeple bu bölümde ince agregâ özgül ağırlık deney aletleri ve deneyin yapılışı tekrar anlatılmamış, sadece deney sonucu (Çizelge 4.7) verilmiştir.

Çizelge 4.7 Filler özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Piknometre ağırlığı	a	120.5
Piknometrenin su ile dolu ağırlığı	b	1305.3
Piknometre+YKSD numune ağırlığı	c	625.7
Piknometre+su+YKSD numune ağırlığı	d	1619.8
Kuru numune ağırlığı	e	500
Zahiri Özgül Ağırlık	$E/((B-D)+E)$	2.708

4.1.6. Agreg a birim ağırlık deneyi

Kullanılan Standartlar: TS-3529

Agreg a birim ağırlık deneyi, agregaların sıkışık ve gevşek durumlarındaki birim ağırlıklarının hesaplanması amacıyla yapılmaktadır. Agreg a içerisindeki en büyük dane çapına göre kullanılacak numune miktarı değişmektedir (Özen, 2005).

4.1.6.1. Kullanılan aletler

Terazi: 20 kg çekerli, 1 gr duyarlı bir terazi.

Şişleme çubuğu: Çelikten yapılmış, 600 mm boyunda, 16 mm çapında, ucu yarım küre biçimli düz çubuk.

Ölçü kapları: Hacmi belli olan, silindirik şeklinde, su geçirmez, deforme olmayacak kadar dayanıklı metalden yapılmış, her iki ucunda kulpları bulunan kaplar (Şekil 4.8).

4.1.6.2. Denevin yapılışı

Sıkışık birim hacim ağırlık için

- Hacmi belli olan (V) metal ölçü kabı tartılır (W_1).
- Metal ölçü kabının yüksekliğinin üçte birine kadar, belli miktarda hazırlanmış ve kurutulmuş deney numunesi doldurulur.
- Numune şişleme çubuğu yardımı ile yüzeyin her tarafına yayılacak şekilde 25 vuruş yapılarak şişlenip (Şekil 4.9) sıkıştırılır.
- Sıkıştırma işlemi kabın her üçte birlik kısmı doldurulup tekrarlanır.
- Şişleme işlemi tamamlandıktan sonra ölçü kabının üst yüzeyinden taşan agreg a fazlası sıyrılarak alınır.
- Ölçü kabı agreg a ile birlikte tartılır (W_2).



Şekil 4.8 Ölçü kabı

Gevşek birim hacim ağırlık için;

- Hacmi belli olan (V) metal ölçü kabı tartılır (W_1).
- Belli miktarda hazırlanmış ve kurutulmuş deney numunesi metal ölçü kabının içerisine, bir kürek yardımıyla taşarcasına doldurulur.
- Küreğin ölçü kabının üst yüzeyinden 5 cm daha yukarı kaldırılmamasına ve agreganın sıkışmamasına dikkat edilir.
- Ölçü kabı üstündeki fazla agrega el yardımıyla sıyrılarak alınır.
- Ölçü kabı agrega ile birlikte tartılır (W_2) (Özen, 2005).



Şekil 4.9 Numune şişlenmesi

4.1.6.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Agreganın **sıkışık** birim hacim ağırlığı aşağıda verilen şu formül yardımıyla hesaplanır (Özen, 2005).

$$B_s = \frac{W_2 - W_1}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Bu formülde;

B_g : Sıkışık birim hacim ağırlık

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

W_2 : Sıkışık agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

V: Ölçü kabı iç hacmi (m^3)

Agregaya uygulanan birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.8 Sıkışık birim hacim ağırlık deney sonucu

Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)	W_1	4.2558 kg
Sıkışık agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)	W_2	9.9905 kg
Ölçü kabı iç hacmi (m^3)	V	$3 \text{ dm}^3 = 0.003 \text{ m}^3$
Sıkışık birim hacim ağırlık	B_s	$1911.6 \frac{kg}{m^3}$

Agreganın gevşek birim hacim ağırlığı aşağıda verilen şu formül yardımıyla hesaplanır (Özen, 2005).

$$B_g = \frac{W_2 - W_1}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Bu formülde;

B_g : Gevşek birim hacim ağırlık

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

W_2 : Gevşek agregası ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

V: Ölçü kabı iç hacmi (m^3)

Çizelge 4.9 Gevşek birim hacim ağırlık deney sonucu

Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)	W_1	4.2558 kg
Gevşek agregası ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)	W_2	9.5250 kg
Ölçü kabı iç hacmi (m^3)	V	$3 \text{ dm}^3 = 0.003 \text{ m}^3$
Gevşek birim hacim ağırlık	B_g	$1756.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

4.1.7. Yassılık indeksi tayini

Kullanılan Standartlar: (BS 812, TS 9582)

Yassılık İndeksi Tayini deneyi ile yassı danelerin denenen agregası ağırlığına oranı belirlenmektedir. Deney, en küçük boyutu, en büyük nominal boyutunun 0.6 ‘sından daha küçük olan agregası danelerinin yassı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. İki elek arasında kalan danelerin nominal boyutu, bu iki elek açıklığının aritmetik ortalamasıdır. Agregası numunelerinin yassılık indeksi, yassı danelerin ayrılması ile bulunan ağırlığın deneye alınan toplam numune ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Deney 63.0 mm elek üzerinde kalan ve 6.3 mm eleği geçen numunelere uygulanmaz.

4.1.7.1. Kullanılan aletler

Terazi: Biri en az 15 kg kapasitede 1 gram hassasiyette, diğeri 2-3 kg kapasitede 0.1 gram hassasiyette 2 adet terazi.

Elekler: Yassılık indeksi tayini elek seti.

Yassılık indeksi şablonu: Belirli boyutlardaki malzemelerin deneneceği, üzerinde elipsoit açıklığa sahip deliklerin bulunduğu şablon (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Yassılık indeksi şablonu

4.1.7.2. Deneyin yapılışı

Deney elekleriyle eleme

- Deney numunesi elenir.
- 4 mm'lik elekten geçen ve 80 mm'lik elekte kalan taneler tartılır ve işlem dışı bırakılır.
- 4 mm ve 80 mm arasındaki her tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i 'deki bütün taneler tartılır ve ayrı ayrı muhafaza edilir.

Çubuk eleklerle eleme

- Deney elekleriyle elenerek elde edilen her tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i

Çizelge 4.10’da verilen uygun çubuklu elekten elenir.

- Bu eleme işlemi elle gerçekleştirilmeli ve elek üzerinde kalan malzemenin kütlesi 1 dakikalık eleme işlemi sonrasında % 1’den daha fazla değişmiyorsa işlem tamamlanmış olarak kabul edilir.

- Çubuklu elekten geçen her tane büyüklüğü fraksiyonundaki malzeme tartılır.

Çizelge 4.10 Deneye alınacak minimum malzeme miktarı ve boyutları

Elek Açıklıkları (mm)	Her Fraksiyon için Min.Malzeme Miktarı (kg)
63-0.50	25
50-37.5	18
37.5-25	8
25-19	2.5
19-12	1
12-9.5	0.5
9.5-6.3	0.25

4.1.7.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Her fraksiyonun yassı dane yüzdesi, aşağıda verilen formülde gösterilen biçimde ayrı ayrı hesaplanır. Her fraksiyona ait yassı dane yüzdesi, o fraksiyonun düzeltilmiş gradasyon yüzdesi ile çarpılarak gerçek yüzde hesaplanır. Deney sonucu Çizelge 4.11’de verilmiştir.

$$\text{Yassı dane yüzdesi} = \frac{M_2 \times 100}{M_1}$$

Bu formülde;

M_1 : Deneye alınan malzeme ağırlığı (gr)

M_2 : Deneyde bulunan yassı malzeme ağırlığı (gr)

Çizelge 4.11 Yassılık indeksi deney sonucu

Deneye alınan malzeme ağırlığı (gr)	M_1	2300
Deneyde bulunan yassı malzeme ağırlığı (gr)	M_2	361
Yassı dane yüzdesi	%15.69	

4.1.8. Agregada organik madde tayini

Kullanılan Standartlar: (TS 3673)

Agregaların içinde organik madde bulunup bulunmadığını ve varsa oranını belirlemek üzere renklendirme metodu adı verilen yöntem kullanılmaktadır.

4.1.8.1. Kullanılan aletler

Cam eprüvet: Seviye gösteren camdan yapılmış tüp.

Sodyum hidroksit: Sulu eriyik hazırlamak için bir miktar sodyum hidroksit.

4.1.8.2. Deneyin yapılışı

- 1lt suya 30 gr NaOH konulmak suretiyle sodyum hidroksit eriyiği hazırlanır.
- Bir cam eprüvetin 100. seviyesine kadar konulan agrega üzerine bu eriyikten 160. seviyeye ulaşınca kadar dökülür.
- Eprüvet içindikiler dökülmeden kuvvetli bir şekilde çalkalanır.
- Bundan 24 saat hareket ettirilmeden muhafaza edilir.
- Bu müddet sonunda agreganın üstündeki eriyik rengini değiştirir.
- Eriyiğin aldığı renkle (Şekil 4.11) ilgili Çizelge 4.12’de verilen sonuçlar çıkarılır.

Çizelge 4.12 Agregalarda organik madde etkisi

Eriyik rengi	Organik madde	Agreganın durumu
Renksiz veya çok hafif sarı	Organik madde ya hiç yok veya çok az var	Yüksek kaliteli beton için kullanılmaya elverişli
Safran sarısı	Az miktarda var	Normal işlerde kullanılır
Belirli kırmızı	Var	Önemsiz işlerde kullanılır
Belirli kahverengi	Çok var	Kullanılmaz



Şekil 4.11 Agregalarda organik madde

4.1.8.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Yukarıdaki şekilde yapılan deneyde agrega üstündeki suda eriyiğinin rengi yukarıdaki eriyiğin renginden açık ise organik madde ya hiç yoktur ya da zarar meydana getirmeyecek miktarda agrega içinde bulunmaktadır.

4.1.9. Donmaya ve çözünmeye karşı direnç

Kullanılan Standartlar: (TS 1367-1; ASTM-C88; AASHTO T-104)

Bu deney, agreganın üst üste donma çözünme etkilerine maruz kaldığında nasıl davranacağını laboratuvar koşullarında önceden bilmesini sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Soğutma ve donma işlemlerinin soğutucu bulunmaması nedeniyle yapılamaması halinde veya sonuca kısa sürede varılmak istendiğinde deneyi

hızlandırmak amacıyla kimyasal yöntem uygulanır. Çalışmada kimyasal yöntem uygulanmıştır.

4.1.10.1. Kullanılan aletler

Havalandırma etüv: Sıcaklığı sürekli olarak $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ’ de tutabilen ve bu sıcaklıkta buharlaşma hızı en az 25 gr/saat olan hava dolaşimli etüvdür.

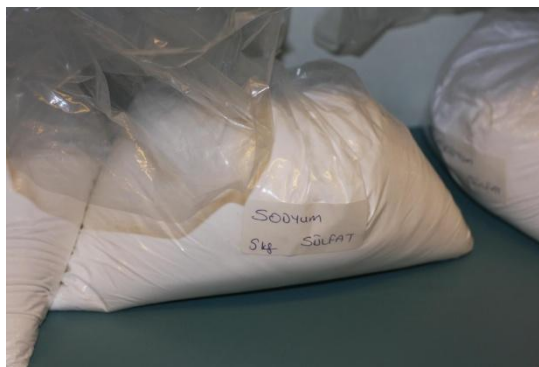
Terazi: Yeterli tartım kapasitesinde ve $\pm 0,1$ g doğrulukla tartabilen.

Metal tepsiler: Dikişsiz çekilmiş veya kaynaklı, 0,6 mm et kalınlığına sahip korozyona dayanıklı metalden imâl edilmiş, 2000 ml kapasiteli, 120 mm ilâ 140 mm'lik iç çap ve 170 mm ilâ 220 mm'lik iç yüksekliğe sahip metal kutular, uygun kapaklarla kapatılmalıdır. Hafif agregaların, metal kutulara uygun şekilde yerleştirilmesine özen gösterilmelidir.

Deney elekleri: ASTM E 11 veya E 233’e uygun kare göz açıklıklı eleklerdir.

Su: Damıtık veya deiyonize.

Reaktifler: Sodyum sülfat çözeltisi (Şekil 4.12), en az 350 gr. Susuz sodyum sülfat tozu (Na_2SO_4) veya en az 750 gr. Kristalize sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki 1 lt su içinde çözülmesi suretiyle oluşturulur.



Şekil 4.12 Sodyum sülfat (Na_2SO_4)

4.1.10.2. Deneğin yapılışı

- Sodyum sülfat çözeltisi, en az 350gr susuz sodyum sülfat tozu (Na_2SO_4) veya en az 750 gr. kristalize sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 25-30°C sıcaklıktaki 1 lt su içinde çözülmesi suretiyle oluşturulur. Suya sodyum sülfat tozu ilave edilirken ve kullanım anına kadar çözelti sık sık karıştırılır ve deneyde kullanılıncaya kadar buharlaşmanın engellenmesi amacıyla kova kapalı tutulur.
- Çözelti $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar soğumaya bırakılır. Çözelti kullanılmadan önce en az 48 saat $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bekletilip zaman zaman karıştırılır. Çözeltinin kullanılacağı andaki yoğunluğu $1.151\text{-}1.174 \text{ gr/cm}^3$ aralığında olmalıdır.
- Numune tel sepetin içine konulur ve üzeri en az 10 mm çözelti ile örtülecek şekilde sepet ile birlikte, içinde sodyum sülfat çözeltisi bulunan kovaya daldırılır. 16 ile 18 saat arası bir süre çözelti içinde bekletilir.
- Buharlaşma kaybını engellemek amacıyla sodyum sülfat çözeltisi bulunan kova kapak ile kapatılır ve çözelti içinde bekleme süresi boyunca sıcaklık $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de tutulur.
- Daldırma süresinin sonunda numune çözeltinin içinden çıkartılır ve çözeltinin süzülebilmesi için 15 ± 5 dakika bekletilir.
- $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklığa getirilmiş etüve konularak değişmez ağırlığa kadar kurutulur.
- Numune oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur ve tekrar çözelti kovaına daldırılır. Daldırma, çıkartıp kurutma işlemi toplam 5 kez tekrarlanır.
- Son döngünün arkasından kurutulup soğutulan deney numunesi, sodyum sülfat çözeltisinden tamamen arındırılıncaya kadar, BaCl_2 çözeltisi ile reaksiyon vermeyinceye kadar kontrollü bir şekilde yıkanır. Numunenin sülfattan tamamen arındığı, yıkama suyuna bir miktar baryum klorür ilave edildiğinde beyaz çözelti görülmemesi ile belirlenir. Yıkama işlemi süresi boyunca agregaların aşınma ve darbeye maruz kalmamasına dikkat edilir.

4.1.9.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

İlk numune ağırlığı ile deney sonu kaybın belirlenmesinde kullanılan elekte kalan agrega ağırlığı arasındaki fark % kayıp olarak hesaplanır. Her bir dane sınıfı için don kaybı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$D = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100 (\%)$$

Bu formülde;

D: Don kaybı oranı

G_1 : Numunenin deney başlangıcındaki etüv kurusu ağırlığı (gr)

G_2 : Numunenin deney sonunda elek üstünde kalan kısmının etüv kurusu ağırlığı (gr)

Kimyasal yöntem uygulanarak don kaybı oranı belirlenen agregalara ait sonuç Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13 Don kaybı oranı deney sonucu

Numunenin deney başlangıcındaki etüv kurusu ağırlığı (gr)	G_1	300
Numunenin deney sonunda elek üstünde kalan kısmının etüv kurusu ağırlığı (gr)	G_2	283.6
D:Don kaybı oranı	%5.467	

4.1.10. Agrega deneyleri toplu sonuçları

Deneylerde kullanılan agregalara uygulanmış olan, yukarıda yapılaş ve hesaplama yöntemleri anlatılan agrega deney sonuçları aşağıda Çizelge 4.14'teki gibidir.

Çizelge 4.14 Agrega deneyleri toplu sonuçları

Malzeme Özelliği	Deney Sonucu			İlgili Standart	İstenilen Sınırlar
	Kaba	İnce	Filler		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.620	2.622	2.708	ASTM C 127 TSEN 1097/6	—
Su Emme (%)	0.225	1.040		ASTM C 127 TSEN 1097/6	<2.5
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	1911.6			TS 3529	—
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	1756.4			TS 3529	—
Aşınma Kaybı (%)	28.912			ASTM C 131 TSEN 1097/2	<30
Yassılık İndeksi (%)	15.69			TS 9582	—
Organik Madde Tayini	Organik madde ya hiç yok veya çok az var			TS 3673	—

4.2. Bitüme Uygulanan Deneyler

Yol kaplamalarında kullanılacak bitümün teknik şartnamelerde istenilen değerlere sahip olup olmadığını belirlemek için yapılan deneylerdir. Türkiye’de kullanılan bitüm şartnamesi Çizelge 4.17’de verilmiştir.

4.2.1. Yumuşama noktası deneyi

Kullanılan Standartlar: (ASTM D36-95, TS 120 EN 1427)

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık karşısındaki yumuşama davranışlarını, kıvamlılığını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir.

4.2.1.1. Kullanılan aletler

Isıtıcı: Yarı otomatik veya otomatik deney aleti (Şekil 4.13).

Su: Yeni kaynatılmış, damıtılmış su. Suyun yeni kaynatılmış olması deney sonucunu etkileyen bir faktördür. Çünkü kaynatma işlemi deney numunesi yüzeyindeki hava kabarcıklarını önleme açısından önemlidir.

Halkalar: Pirinçten yapılmış, uygun boyutlu, omuzları kare olacak biçimde iki adet (Şekil 4.14).

Bilyeler: Çapları 9.50 ± 0.05 mm olan, iki adet çelik bilye.

Beherler: 600 veya 800 cm^3 lük beher (Şekil 4.14).

Karıştırıcı: Banyonun her yerinde düzgün bir sıcaklık elde etmek amacıyla, beher dibinde dönecek bir mıknatıs.

Termometre: Uygun cıvalı bir termometre.



Şekil4.13 Yumuşama noktası deney düzeneği



a b
Şekil 4.14 Halkalar (a) ve beher (b)

4.2.1.2. Denevin yapılışı

- İlk olarak başlangıç sıcaklığı 5 ± 1 °C olacak su beher içerisine koyulur. Deney numunesi halkaları, bilye sabitleme kılavuzları ve termometre beher içerisine uygun bir şekilde yerleştirilir. Beher ısıtıcı üzerine konulur.
- Pens yardımıyla her bir bilye merkezleme kılavuzuna yerleştirilir.
- Banyo ısı değişimine maruz kalmayacak şekilde her türlü dış etkiye karşı muhafaza edilmeli ve suyun deney sonucunu etkileyecek maddelerle kirlenmesi engellenmelidir.
- Su karıştırılırken, sıcaklık düzgün olarak dakikada 5 °C artacak şekilde ısıtılır.
- Deney halkaları içerisindeki bağlayıcının aşağıya sarkan kısmı taban yüzeyinde değdiği anda (Şekil 4.15) sıcaklıklar okunarak deney bitirilir. Okunan değerler yumuşama noktası olarak kaydedilir (Özen, 2005).



Şekil 4.15 Yumuşama noktası deney sonucu

4.2.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

İki bilyeden her biri için elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, yumuşama noktası $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında olan numuneler için $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde olan numuneler için $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi geçerse deney tekrar edilmelidir. Deney sonuçları Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.15 Isıtma kaybı öncesi yumuşama noktası deney sonucu

DENEY	SICAKLIK $^{\circ}\text{C}$
1	46
2	47
ORT	46.5

Çizelge 4.16 Isıtma kaybı sonrası yumuşama noktası deney sonucu

DENEY	SICAKLIK $^{\circ}\text{C}$
1	52
2	52
ORT	52

4.2.2. Penetrasyon deneyi

Kullanılan Standartlar: (ASTM D 5-97, TS 118 EN 1426)

Penetrasyon deneyinde, standart bir iğnenin belirli bir yük altında, belirli bir süre içinde, sıcaklığı belirli numuneye dikey doğrultudaki batma uzunluğunun bulunması ile bağlayıcının kıvamlılığı belirlenmektedir.

4.2.2.1. Kullanılan aletler

Penetrometre (Penetrasyon Cihazı) : Sürtünmeye uğramadan serbestçe batabilen standart bir iğne ile batma miktarını tespit eden hassas cihaz (Şekil 4.16).

İğne : Penetrometre cihazının iğnesi; 51 mm boyunda 1 – 1.02 mm çapında silindirik çelikten yapılmıştır. İğnenin 6.5 mm uzunluktaki uç kısmı 8 °C 40 dakika ile 9°C 40 dakikalık açığı hayiz bir koni teşkil ederek sivrileştirilmiştir. Sivri ucun çapı 0.14 – 0.16 mm olacak şekilde aşındırılarak külleştirilmiş, aynı zamanda sertleştirilmiş ve parlatılmıştır. İğne penetrometreye takıldığında, iğnenin dışında kalan kısım 40 – 43 mm arasındadır.

Numune Kabı: Metal veya camdan, silindirik ve dibi düz yapılmış kaptır. Penetrasyonun 200 ve daha aşağı olan maddeler için kullanılacak kabın iç çapı 55 mm ve iç derinliği 35 mm, penetrasyonun 200 den yukarı olanları için kullanılacak kabın iç çapı 70 mm ve iç derinliği 45 mmdir.

Taşıma Kabı: Numune kabının konduğu taşıma kabı, dibi düz silindirik metal veya camdan yapılmış kaptır. İç çapı en az 90 mm, yüksekliği 55 mm olan taşıma kabının tabanı numune kabının sallanmadan oturmasını sağlayacak şekilde yapılmıştır.

Su banyosu: En az 10 cm su alacak hacimde ve 25°C ye ayarlanabilen bir regülatörle teçhiz edilmiştir. Banyonun numuneyi tabandan 5 cm yukarıda ve su sathından 10 cm derinlikte tutacak delikli bir rafı bulunmaktadır.

Çizelge 4.17 Yol Üst Yapılarında Kullanılan Asfalt Çimentolarının Özellikleri

SINIFLAR	TS NO	10-20		20-30		30-40		40-50		60-70		75-100		120-150		150-200		200-300	
		Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak
Penetrasyon, 25°C, 100g, 5sn	TS 118	10	20	20	30	30	40	40	50	60	70	75	100	120	150	150	200	200	300
Yumuşama noktası (halka ve bilya metodu), °C	TS 120	63	73	57	67	52	62	49	59	45	55	44	49	40	46	37	44	27	37
Duktilite, 25 °C, 5 cm/dak, cm olarak	TS 119	5	-	15	-	40	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
Trikloroetilende çözünürlük, %	TS 1090	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-
İnce film halinde ısıtma* 3.2 mm, 163 °C, 5 saat, ağırlık kaybı %	TS 1086	-	0.5	-	0.5	-	0.5	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.0	-	1.0	-	1.0
Isıtma kaybindan sonraki penetrasyon (Orijinal penetrasyonun %si olarak)		60	-	60	-	60	-	58	-	54	-	50	-	46	-	43	-	40	-
Isıtma kaybindan sonraki duktilite, 25 °C, 5 cm/dak, cm olarak		-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-	100	-
Parlama noktası (Cleveland açık kap), °C	TS 123	275	-	250	-	250	-	230	-	230	-	230	-	220	-	200	-	175	-
Leke deneyi **	TS 1089																		
Standart nafta ile		Bütün sınıflar için negatif																	
Nafta-ksilen ile		Bütün sınıflar için negatif																	
Heptan-ksilen ile		Bütün sınıflar için negatif																	
(*)İnce film halinde ısıtma deneyinin kullanılması ihtiyaridir. (**)Leke tecrübesinin kullanılması ihtiyaridir. Şart koşulduğunda, çözücü olarak ağır solvent nafta, nafta-ksilen veya heptan-ksilen çözücülerinden hangisinin kullanılacağı, ksilenli çözücülerin kullanılması takdirinde ise ksilenin yüzdesinin ne olacağı belirtilmelidir.																			



a b
Şekil 4.16 Penetrasyon cihazı (a) ve numune (b)



a b
Şekil 4.17 Su banyosu (a) ve deney anı (b)

4.2.2.2. Deneyin yapılışı

Numunenin kolayca dökülebilmesi için numune fazla ısıtılmamalıdır. Sıcaklığın 90° geçmemesi gerekir ve numune homojen hale gelecek şekilde karıştırılmalıdır. Numune kaba dökülür, eğer deney farklı koşullarda yapılacaksa her koşul için ayrı ayrı kaplar hazırlanır. Kapların ağzı kapatılarak tozdan ve dış müdahalelerden korunur ve soğuma için oda sıcaklığında 1 - 1.5 saat bekletilir.

- Temiz iki numune kabı, tahmin edilen yumuşama noktasının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılan bir numune ile, iğnenin tahmin edilen girme miktarından en az 10mm fazla olacak şekilde doldurulur.
- Numunenin tozlanmamış ve kirlenmemiş olmasına dikkat edilir. İğne yuvası ve kılavuzu, su ve diğer harici maddelerle kirlenmemiş olup olmadığı yönünde kontrol edilir.
- Numune kaplarından biri penetrometreye yerleştirilir (Şekil 4.17). Penetrasyon iğnesi, ucu numune yüzeyindeki yansıması ile temas edinceye kadar fakat numuneye batmayacak şekilde yavaşça aşağı doğru indirilir. İğnenin sıfır noktası kaydedilir ve belirlenen süre içerisinde iğne tutucusu seri bir şekilde serbest bırakılır.
- Numune kabı hareket ederse ölçüm dikkate alınmaz. Üç ayrı iğne ile, numune kabı kenarlarından en az 10mm mesafede ve birbirlerine 10mm den yakın olmayan noktalardan en az üç geçerli ölçüm yapılır.
- 25 °C’ de 100 gramlık kütle kullanılarak üç ölçümün 5 saniye içerisinde gerçekleştiği tayinlerde, ölçümler arasındaki fark Çizelge 4.18’de verilen değere karşılık gelen değeri aşmadığında deneyler geçerli sayılır.

Çizelge 4.18 Ölçümler arasında olabilecek en büyük fark

0.01 mm olarak penetrasyon	<49	50-149	150-249	>250
En büyük fark	2	4	6	8

4.2.2.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması, en yakın tam sayıya yuvarlatılarak ve milimetrenin onda biri cinsinden penetrasyon değeri olarak alınır. Sonuçlar Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.19 Isıtma kaybı deneyi öncesi penetrasyon değeri

Deney	Batma miktarı
1	6.03
2	5.9
3	5.62
ORTALAMA	5.85

Çizelge 4.20 Isıtma kaybı deneyi sonrası penetrasyon değeri

Deney	Batma miktarı
1	6.13
2	5.75
3	6.18
ORTALAMA	6.02

Viskozite ve penetrasyon derecesi benzer sayılarla verilir (Çizelge 4.21). Örneğin 85-100 penetrasyonlu asfalt, 50-100 viskoziteli asfalt gibi. Fakat bunlar farklı şeylerdir. Bunların benzer şekilde ifade edilmesi yanlışlara yol açar. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak bağlayıcı söz konusudur. Buna karşılık viskozitede durum terstir. Normal yol işlerinde kullanılan asfaltların penetrasyonu 30 ile 300 arasında değişir. Penetrasyonu aynı olan iki asfalttan yumuşama noktası yüksek olan sıcağa daha dayanıklıdır.

Viskozite, asfaltın belirli bir sıcaklıkta veya sıcaklık aralığındaki akışkanlığıdır. Asfaltın temel özelliğini belirlemektedir. Katı asfaltın mühendislik özelliklerini belirlemek üzere viskozite testleri uygulanmaktadır. Katı asfaltların 60 °C’de akmalarının tespiti zor olduğundan dolayı viskozite testleri 135 °C’de yapılmaktadır. Ham petrolün damıtılması aşamasında kalıntı maddeler içinde yer alan katı asfalt, katılıklarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır;

Çizelge 4.21 Penetrasyon ve viskozite sınıfları arasındaki ilişki

Penetrasyon Sınıfı	Viskozite Sınıfı
40-50 Pen. AC	AC-40
60-70 Pen. AC	AC-20
85-100 Pen. AC	AC-10
120-150 Pen. AC	AC-5
200-300 Pen. AC	AC-2.5

Ülkemiz iklim koşulları için en uygun asfalt tipi 85-100 Pen. AC olmakla birlikte, sıcak iklim bölgelerinde ve ağır trafik yükü alan yollarda 60-70 Pen. AC kullanılmaktadır.

Asfaltların katılıklarında penetrasyon değerleri belirleyicidir. Asfaltların penetrasyon değerleri ile viskozlukları arasındaki ilişki Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 Bitüm Penetrasyon ve Viskozite Değerleri Arasındaki İlişki

Penetrasyon (25°C, 100gr, 5 sn)	Viskozite (60°C, Poise)	Asfalt Tipi	
		Penetrasyon Sınıfı	Viskozite Sınıfı
40	4000±800	40-50	AC-40
60	2000±400	60-70	AC-20
80	1000±200	85-100	AC-10
140	500±100	120-150	AC-5
220	250±50	200-300	AC-2.5

4.2.3. Düktilite deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 119, ASTM D113)

Yol kaplamalarında kullanılacak bitümün uzaman kabiliyetini belirlemek üzere yapılan bir deneydir. Bir numunenin düktilitesi, belirtilen koşullar altında standart bir briketin kopmadan uzayabileceği (cm) cinsinden uzaklık olarak belirtilir. Düktilite, yavaş etkiyen yükler altında bağlayıcının esneme kabiliyetinin bir ölçüsüdür.

4.2.3.1. Kullanılan aletler

Kalıp: Standartlara uygun düktilite kalıpları. Kalıplar şu ölçülere uyacaktır;

En dar kesit: 1cm^2

Kalınlık: 1cm^2

Toplam uzunluk: 7.45 cm-7.55 cm

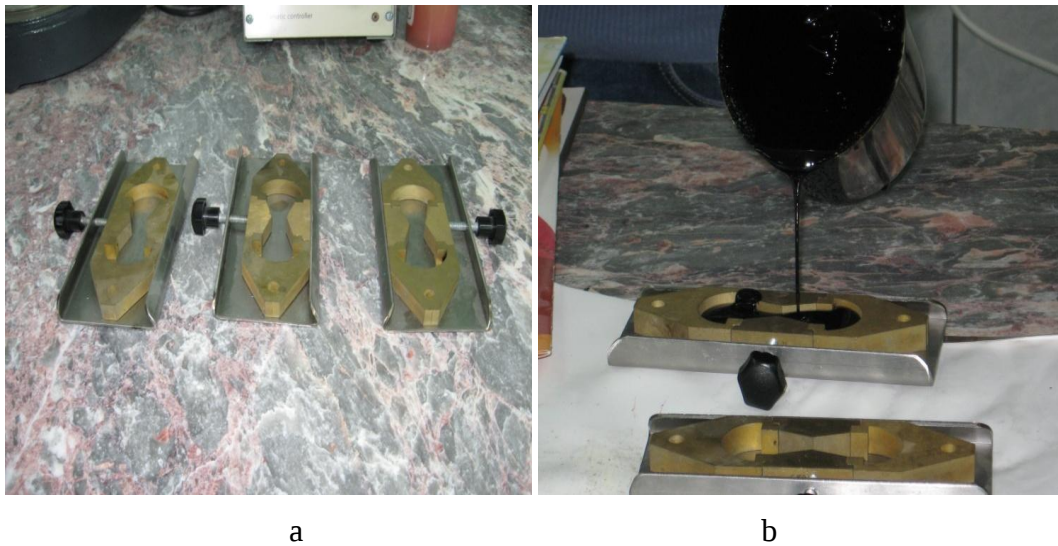
Maşalar arasındaki mesafe: 2.97 cm-3.03 cm

Maşa ağzının genişliği: 1.98 cm- 2.02 cm

Su banyosu: Su banyosu en az 10 dm^2 su alacak hacimde ve su sıcaklığını istenilen hassasiyetle ayarlayabilen bir cihaz olmalıdır. Bunun yanı sıra numuneyi dipten 5 cm yukarıda, su yüzeyinden de 10 cm aşağıda tutabilecek delikli bir rafı bulunmalıdır.

Tuz ve metil alkol: Deney esnasında suyun özgül ağırlığını ayarlama için kullanılabilir.

Düktilite cihazı: Bitümlü deney briketinin, su içerisinde titreşim yapmaksızın çekiminde, kalıbın her iki parçasını bir birinin aksi yönünde düzgün bir hızla çekilmesini sağlayan herhangi bir cihaz (Şekil 4.20).



Şekil 4.18 Numune kalıpları (a), kalıplara numune dökümü (b)



Şekil 4.19 Dökülmüş numuneler



Şekil 4.20 Düktilite Cihazı

4.2.3.2. Deneyin yapılışı

- Bitümlü madde düz bir levha üzerinde hazırlanmış kalıba dökülür (Şekil 4.18). Numune ince iplik halinde kalıbın bir ucundan diğerine gezdirilmek suretiyle doldurulurken, kalıp parçalarının oynayarak briketin şeklinin bozulmamasına dikkat edilir.
- Numune doldurulan kalıp (Şekil 4.19), yarım saat civarı oda sıcaklığında soğutulur ve yine yarım saat kadar 25 ± 0.5 °C deki su banyosunda bekletilir.

- Banyodan çıkarılan kalıptaki bitüm fazlası, ısıtılmış düz bir spatula ile sıyrılarak alınır.
- Kalıptaki bitümlü briket alt levhası ile istenilen sıcaklıktaki su banyosuna konularak 85-95 dakika bekletilir. Buradan çıkarılan briket alt levhadan ve kalıbın yan parçalarından ayrılarak deneye hazır hale getirilir.
- Kalıptaki delikler cihazın primlerine takılır ve istenilen çekme hızıyla bitümlü briket kopuncaya kadar deneye devam edilir (Şekil 4.21), (Şekil 4.22), (Şekil 4.23). Çekme sırasında numune su yüzeyinden 2.5 cm aşağıda bulunmalıdır.



Şekil 4.21 Düktilite deney aşamaları (a)



Şekil 4.22 Düktilite deney aşamaları (b)

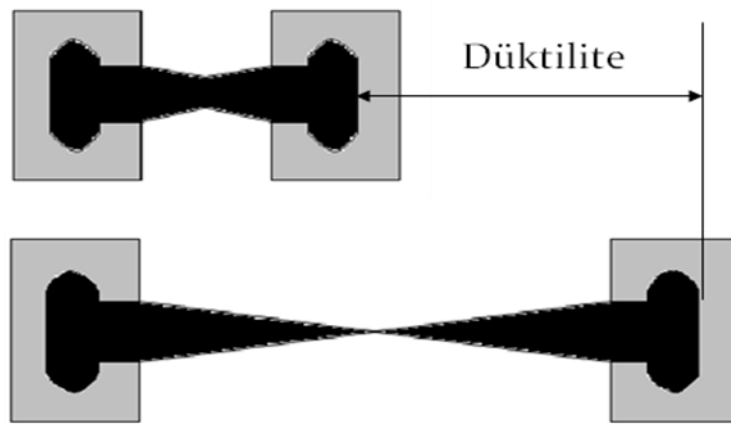


Şekil 4.23 Düktilite deney aşamaları (c)

- Numune koptuğu anda, cihaz üzerinde bulunan cetvelden, uzama miktarı cm cinsinden okunur (Şekil 4.24), (Özen, 2005).

4.2.3.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Üç adet deney sonunda, sonuçların ortalaması numunenin duktilitesi olarak kaydedilir. Deney sırasında numune su yüzeyine çıkar veya banyo tabanına değerse, deney geçersiz kabul edilir. Deney de uzayan bitümlü madde ipliğinin su yüzeyine çıkması ya da tabana değmesini engellemek amacıyla, suyun özgül ağırlığı metil alkol veya tuz ilavesiyle ayarlanır.



Şekil 4.24 Düktilitenin şematik gösterimi

Deney sonuçları Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.23 Isıtma kaybı öncesi ve sonrası düktilite değerleri

ISITMA KAYBI ÖNCESİ	ISITMA KAYBI SONRASI
>100	>100

4.2.4. Elastik geri dönme deneyi

Düktilite cihazında deneye tabi tutulan numuneler 10 cm uzamadan sonra ortadan kesilmiş ve 30 dakika sonra geri dönme miktarları ölçülmüştür (Çizelge 4.24; Çizelge 4.25).

Çizelge 4.24 Isıtma kaybı öncesi elastik geri dönme deneyi sonuçları

Numune	İlk boy (cm)	Son boy (cm)	Elastik geri dönüş (%)
1	6.2	6	3.23
2	6.7	6.5	2.99
Ortalama			3.11

Çizelge 4.25 Isıtma kaybı sonrası elastik geri dönme deneyi sonuçları

Numune	İlk boy (cm)	Son boy (cm)	Elastik geri dönüş (%)
1	6.5	6.4	1.54
2	5.5	5.35	2.73
Ortalama			2.13

4.2.5. Parlama noktası deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 123, EN 22592, ASTM D92)

Parlama noktası, 79°C'nin üzerinde olan petrol ürünlerine uygulanan, ısıtılan deney numunesinin buharına alev temas ettirilerek numunenin parlادığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklığın bulunduğu deneydir.

4.2.5.1. Kullanılan aletler

Cleveland açık kap cihazı: Bir numune haznesi, ısıtma tablası, deney alevi uygulama düzeneği ve ısıtıcıdan meydana gelir (Şekil 4.25).

Termometre: Kısmi daldırılmalı tipte, istenilen özelliklere sahip bir termometre

Kalkan: Hava cereyanını önlemek için gerektiğinde kullanılan amyanttan veya saçtan yapılmış; bir kenarı 46 cm, yüksekliği 61 cm; altı, üstü ve ön cephesi açık bırakılmış kare prizma şeklinde olacaktır.



Şekil 4.25 Parlama noktası deney düzeneği



Şekil 4.26 Termometre ile ısı ölçümü

4.2.5.2. Denevin yapılışı

- Numune haznesi kullanılmadan önce temiz olmasına dikkat edilir. Hazne, numunenin beklenen parlama noktasının 56 °C altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulur.
- Termometre numune haznesi tabanından 6mm yukarıda olacak şekilde, hazne cidarıyla hazne merkezi arasındaki mesafenin ortasına ve deney alevi uygulama tertibatının karşısına gelecek biçimde yerleştirilir (Şekil 4.26).
- Numune haznesi, deney numunesi ile belirli bir seviyeye kadar doldurulur.
- Numunenin sıcaklığı önce hızlı olarak (14-17 °C/dk), parlama noktasına yaklaşıldığında (beklenen sıcaklığa 28 °C yaklaşıncaya) yavaş ve sabit hızla (5.5 °C) yükseltilir.
- Belirli sıcaklık aralıklarıyla (2°C' lik artış sonrası) deney alevi hazne üzerinde gezdirilir.
- Deney alevinin numune üzerindeki buhara tatbik edilmesiyle, numunenin tutuştuğu en düşük sıcaklık (Şekil 4.27), parlama noktası olarak alınır.



Şekil 4.27 Numunenin parladığı an

- Yanma noktasının tayini için, numuneye deney alevi tatbik edilmesiyle, numunenin tutuşarak en az 5 saniye süreyle yanması gerekmektedir. 5 saniye boyunca yandığı sıcaklık yanma noktası olarak kaydedilir (Özen, 2005)
- Sonuçlar barometre basıncına göre düzeltilmelidir.

4.2.5.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Deney alevi, numune üzerindeki buhara uygulanırken, numunenin tutuştuğu en düşük sıcaklık, parlama noktası olarak alınır. Deney sonucu Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.26 Numunenin parlama noktası

Parlama noktası
302°C

4.2.6. Isıtma kaybı deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 121, TSEN 12607/2, ASTM D1754, ASTM D6)

Isıtma kaybı deneyi, 0.32 cm kalınlığındaki bitüm filminin 163°C’de 5 saat boyunca ısıtılmasıyla kütleinde oluşacak kaybın tespiti, bağlayıcı içindeki yüksek ısıda uçabilen maddelerin yüzdesini tayin etmek üzere yapılan bir deneydir. Bu deney sonucu, zamanla hava ve iklim şartlarıyla bitümlü malzemelerin penetrasyon ve Düktilite değerlerinde oluşacak değerler hakkında bilgi vermektedir.

4.2.6.1. Kullanılan aletler

Etüv: Sıcaklığı 163 ± 1 °C’ de tutabilen, önünde etüv kapağını açmadan gerekli sıcaklık ölçümlerinin okunmasına olanak tanıyacak bir penceresi olan, yaklaşık 250 mm çapında, delikli, yuvarlak, döner alüminyum bir rafı bulunan etüv (Şekil 4.28). Bu raf etüvün orasında bulunmalı ve dakikada 5 devir yapmalıdır. Elektrikle ısıtılan 30 x

30 x 30 ebadında otomatik kontrollü, dakikada 5, 6 devir yapabilen ve üzerinde en az 14 cm çaplı 2 numune kabı taşıyan rafı bulunan bir etüvdür. Etüv dört köşe ve yuvarlak çift cidarlı olup, elektrikle ısınacaktır. İç boyutları ısıtma tellerinin kapladığı kısım hariç, yüksekliği en az 30 cm olacaktır.

Deney kabı: Metal veya camdan imal edilmiş, 15 cm çapında, 3.5 mm derinliğinde dibi düz, silindirik bir kap (Şekil 4.29).



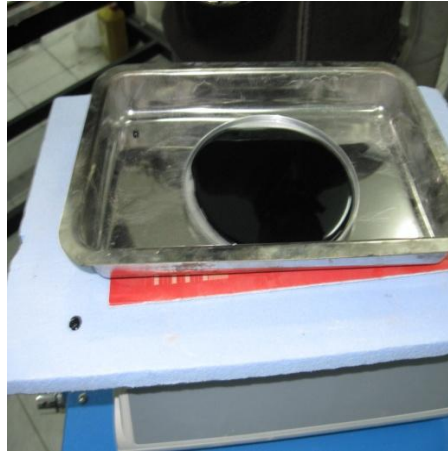
Şekil 4.28 Etüv



Şekil 4.29 Bitümle dolu numune kapları

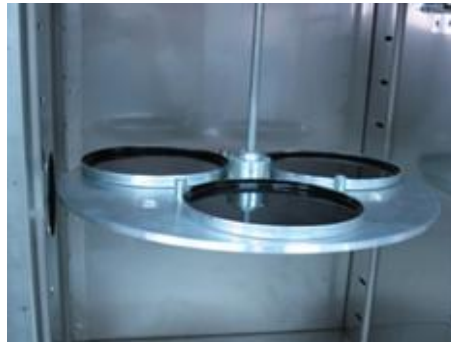
4.2.6.2. Deneyin yapılışı

- Önceden darası tespit edilen deney kabına bitümlü malzemeden 50 ± 0.5 gr konur. Bitüm dolu numune kabı (Şekil 4.30) tartılır (W_1). Bitümlü malzemenin nemsiz olmasına dikkat edilir.



Şekil 4.30 Tartılan numune

- Etüv 163 °C' ye ayarlanarak çalıştırılır. Etüv istenilen sıcaklığa ulaştığında, bitümle dolu deney kabı etüvün raflarından birine konularak etüv kapağı kapatılır.
- Etüvün döner rafı dakikada 5-6 devir/dakika yapmalıdır. Numune etüv içerisinde (Şekil 4.31) 5 saat süre ile bekletilir.
- Numune asla etüv içerisinde 1 saat 15 dakikadan fazla bekletilmemelidir. Bu süre sonunda numune etüvden çıkarılır ve oda sıcaklığına kadar soğutularak tartılır (W_2) (Özen, 2011).



Şekil 4.31 Etüv içerisindeki numuneler

4.2.6.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Bitümlü maddenin ısıtma kaybı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır;

$$\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100(\%)$$

Hesaplanan ısıtma kaybı sonuçları Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27 Isıtma kaybı deneyi sonuçları

Kap	Kap ağırlığı (gr)	(Kap+numune)ilk Ağırlığı (gr)	(Kap+numune)son Ağırlığı (gr)	Isıtma kaybı %
1	53.7	104.1	104	0.20
2	51	100.4	100.3	0.20
3	54.2	104.6	104.6	0.00
ORTALAMA				0.13

Eğer yaptığımız deneyde büyük bir duyarlılık arıyorsak bir seferde, tek bir bitümlü maddeden alınmış bir çift deney numunesi kullanılarak deney yapılır. Bu gibi çift numunelerden alınacak duyarlılık sonuçları aşağıda verilen Çizelge 4.28’deki gibi olmalıdır.

Çizelge 4.28 Isıtma kaybı duyarlılık sınırları

Isıtma Kaybı Değeri (%)	Sayısal Düzeltme	Isıtma Kaybının Gerçek Değeri (%)
5.0	±0.50	4.50-5.50
5.5	±0.51	4.99-6.01
6.0	±0.52	5.48-6.52
10.0	±0.60	9.40-10.60
15.0	±0.70	14.30-15.70
25.0	±0.90	24.10-25.90
40.0	±1.20	38.80-41.20

4.2.7. Özgöl ağırlık deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 1087, ASTM D70)

Bu deney, 25°C’de hacmi bilinen bir bitüm numunesinin ağırlığının, aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı ile elde edilen özgül ağırlığın tayini için yapılmaktadır. Arşimed’in yüzen cisimlerin ağırlığının, kapladıkları hacim kadar sıvının ağırlığına eşit olması ilkesine dayanmaktadır (Özen, 2011). Çok akıcı bitümler için kullanılmaktadır.

4.2.7.1. Kullanılan aletler

Piknometre: Camdan yapılmış, konik veya silindirik biçimde bir piknometre (Şekil 4.32).

Su banyosu: İstenilen sıcaklığa ± 0.5 °C duyarlılıkla ayarlanabilecek bir su banyosu.

Terazi: 0.1 mg hassasiyetle tartım yapabilen bir analitik terazi.



Şekil 4.32 Piknometre

4.2.7.2. Denevin yapılışı

- Piknometre analitik terazide tartılır ve bu tartım kaydedilir (a). Daha sonra 25 °C’ de bulunan damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Su ile dolu piknometre tekrar tartılır ve kaydedilir (b).
- Eğer deney numunesi yeterli akıcılığa sahip değilse bir miktar ısıtılarak yeterli akıcılığa getirilir. Piknometre yaklaşık olarak yarısına kadar bu numuneyle doldurulur.
- Piknometre daha sonra içindeki numune ile birlikte oda sıcaklığına kadar soğutulur ve kapağı ile birlikte tartılır (c).
- Teraziden alınan piknometrenin içerisindeki bitümlü maddenin üzeri damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı sıkıca yerleştirilir. Sonra sıcaklığı 25 ± 0.5 °C’ de tutulan su banyosuna tamamen batırılır. Piknometre bu durumda 30 dakika tutulduktan sonra dışı iyice kurulanır ve tartılır (d) (Özen, 2005)

4.2.7.3. Hesaplama

Maddenin özgül ağırlığı;

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)}$$

formülüyle bulunur.

a = Boş piknometre ağırlığı, gr

b = Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

c = Yarısına kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr

d = Bitüm, saf su ve piknometre ağırlığı, gr

Hesaplanan özgül ağırlık değeri Çizelge 4.29’da verilmiştir.

Çizelge 4.29 Özgöl ağırlık deney sonuçları

Piknometre ağırlığı	a	120.5
Piknometre+su	b	639.46
Piknometre+bitüm ağırlığı	c	380
Piknometre+bitüm+su ağırlığı	d	460
Özgöl ağırlık		1.048

Bu tayin metodu ile elde edilen özgöl ağırlık değerleri arasında ± 0.005 ' ten daha büyük farklar bulunmamalıdır. Özgöl ağırlık tayinleri yapılırken şu ayrıntılara önem verilmelidir:

- Kullanılacak saf su yeni damıtılmış olmalıdır.
- Piknometrenin dışı kurulanırken elin sıcaklığı ile piknometrenin ısınıp genişmesine meydan verilmemelidir.
- Piknometre doldurulurken ve kapağı kapatılırken içinde hava kabarcığı bırakılmamalıdır.
- Tartımlar çabuk yapılmalı ve 1 miligrama duyarlı olmalıdır.

4.2.8. Bitüm deneyleri toplu sonuçları

Çizelge 4.30 Isıtma kaybı öncesi bitüm deneyleri toplu sonuçları

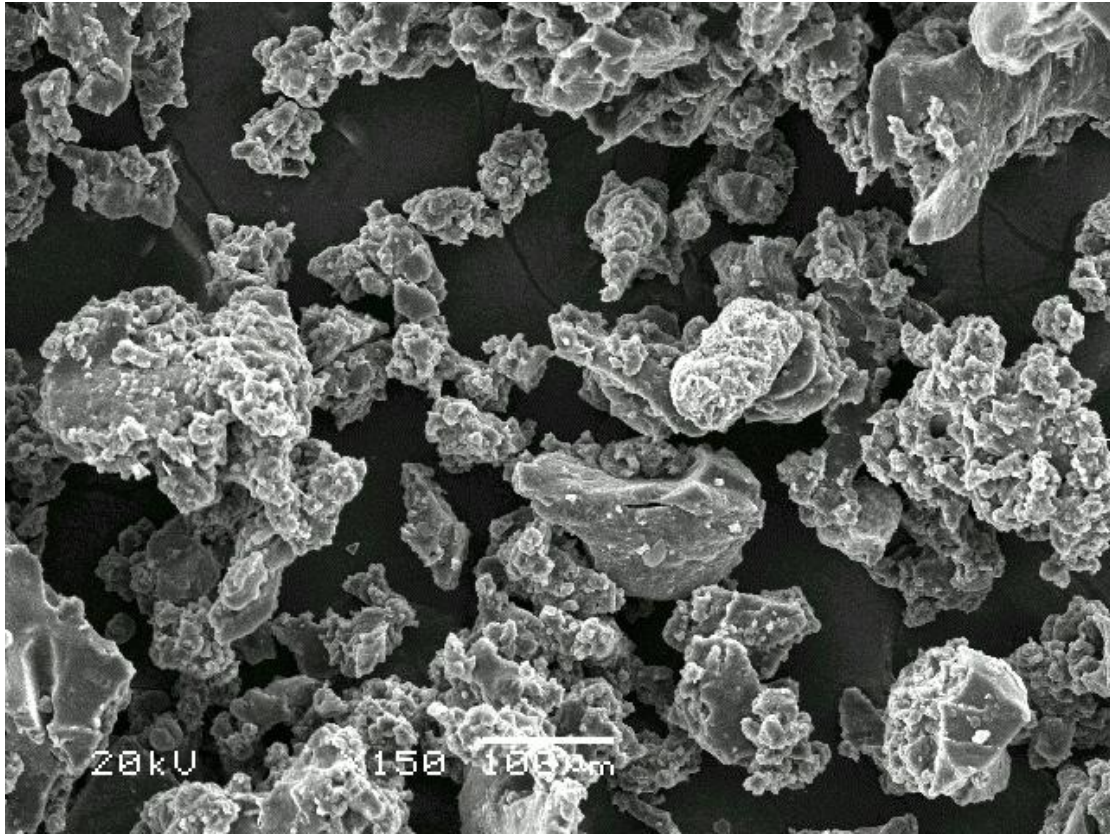
Deney Adı	Deney Sonucu			İlgili Standart	İstenilen Sınırlar
	Katkısız	CRM-300 Katkılı	SMR-400 Katkılı		
Yumuşama Noktası (°C)	46.5	59	65.5	ASTM D36-95, TS 120 EN 1427	46-54
Penetrasyon (25 °C, 1/10 mm)	58.5	46.95	44.3	ASTM D 5-97, TS 118 EN 1426	50-70
Düktilite (25 °C, 5 cm/dk)	>100	<100	<100	ASTM D 113-TS 119	+100
Elastik Geri Dönme (%)	3.11	30.52	36.36		
Parlama Noktası (°C)	302	335	330	ASTM D 92-TS 123 EN 22592	Min. 230
Isıtma Kaybı (%)	0.13	0.21	0.06	TS 121, TSEN 12607/2, ASTM D1754, ASTM D6	Maks. 0.50
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.048	1.037	1.029	ASTM D 70, TS 1087	1.0-1.1

Çizelge 4.31 Isıtma kaybı deneyi öncesi ve sonrası bitüm deneyleri toplu sonuçları

Deney Adı	Deney Sonucu						İstenilen Sınırlar
	Katkısız		CRM-300 Katkılı		SMR-400 Katkılı		
	Isıtma kaybı öncesi	Isıtma kaybı sonrası	Isıtma kaybı öncesi	Isıtma kaybı sonrası	Isıtma kaybı öncesi	Isıtma kaybı sonrası	
Yumuşama Noktası (°C)	46.5	52	58.5	59	62	65.5	46-54
Penetrasyon (25 °C, 1/10 mm)	58.5	60.2	49.4	44.5	48.1	40.5	50-70
Düktilite (25 °C, 5 cm/dk)	>100		<100		<100		+100
Elastik Geri Dönme	3.11	2.13	30.52	18.93	36.36	28.64	
Parlama Noktası (°C)	302		335		330		Min. 230
Isıtma Kaybı (%)	0.13		0.21		0.06		Maks. 0.50
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.048		1.037		1.029		1.0-1.1

4.3. Katkı Maddesine Uygulanan Kimyasal Analizler

CRM-300 katkı maddesinin, kullanılmış otomobil lastiğinden elde edilmiş yöntemine, sonuçta oluşan toz lastik tanelerinin mısır patlağına benzeyen şekline ve CRM-300'ü diğer lastik katkılardan ayıran bu yüzey özelliğine Bölüm 3.3'te değinilmiştir. Bu yapının anlaşılabilir ve gözle görülebilir olması bakımından elde edilen toz lastiğin mikroskobik görüntüleri alınmış (Şekil 4.33), kimyasal analizleri (Çizelge 4.32; Çizelge 4.33) yapılmıştır.



Şekil 4.33 CRM-300'ün mikroskobik görüntüsü (*1000)

Çizelge 4.32 CRM-300 katkı maddesi elementer analiz sonuçları (a)

Component	Type	Conc.	Units	
C O ₂	Calc	31.082	wt. %	
MgO	Calc	4.123	wt. %	
SiO ₂	Calc	2.774	wt. %	
CaO	Calc	62.021	wt. %	
		100.000	wt. %	Total

Çizelge 4.33 CRM-300 katkı maddesi elementer analiz sonuçları (b)

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units
C	Ka	20.07	2.832	15.111	8.483	wt. %
O	Ka	107.22	6.547	58.048	43.407	wt. %
Mg	Ka	63.25	5.028	2.189	2.487	wt. %
Si	Ka	44.26	4.206	0.988	1.297	wt. %
Ca	Ka	1,477.53	24.302	23.664	44.327	wt. %
				100.000	100.000	wt. %

4.4. Karışıma Uygulanan Deneyler

Karayolu üstyapısında bitümlü karışımların performanslarını değerlendirmek, bitümlü tabakanın tabanında oluşan ve çatlamalara neden olan çekme gerilemelerine ve taban zemini üzerinde oluşan basınç deformasyonlarına karşı dayanıklı bir üstyapı tasarlamak, karışımı optimize etmek üzere yapılan deneylerdir (İsfalt, 2001).

Deneyisel çalışmada 1100 gr olarak alınan agregalara, sırasıyla % 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 değişen oranlarda bitüm ilavesi ile ısıtmalı mikserde karışımlar hazırlanmıştır. Her bitüm oranı için 3 numune hazırlanmıştır. Karışım sıcaklığı 160 °C dir. Numunelerin her iki yüzeyine Marshall kompaktöründe 50 vuruş yapılmıştır. Hazırlanan karışımlara ait pratik özgül ağırlık, Marshall Dayanımı, boşluk oranı ve bitümle dolu boşluk oranı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca CRM-300 ve SMR-400

katkılı hal için ayrı ayrı Marshall Deneyi uygulanmıştır. 50-70 Penetrasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanan numuneler için deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.4.1. Marshall deneyi

Kullanılan Standartlar: (TS 3720 ASTM D6927 TSEN 12697/34)

Asfalt betonu içinde kullanılacak optimum bitüm miktarını tayin etmek üzere yapılan deneydir. Bu deney aynı zamanda, maksimum dane boyutu 25 mm' ye kadar olan agregaları içeren kaplama karışımlarının akma direncinin bulunması, karışım hesabının yapılması, imalat ve sonrası için gerekli bilgilerin elde edilmesini sağlar.

Deneyisel çalışmada her bir karışım için Aşınma Tabakası Tip-2 agrega gradasyonu ile 1100 gr agrega hazırlanmış, karışımında 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

4.4.1.1. Kullanılan aletler

Marshall tokmağı: Yaklaşık olarak 4536 gr ağırlığındaki silindirik tokmağın, 457mm yükseklikten, sıkışacak zemin üzerine serbest düşme yapmasını sağlayan düzenektir. Yol yapımında silindiriğin gördüğü görevi laboratuvar ortamında gerçekleştirir.

Mikser: Agregası ve bitümün birbirine homojen biçimde karışmasını sağlayan cihazdır (Şekil 4.34). Isı kaybının önlenmesi için, mikser ucunun etüv içerisinde sıcak halde bekletilip karışım yapılacağı zaman miksera takılması gerekir.

Mikser ısıtma kabı: Agregası ve bitümün mikser tarafından karıştırılırken ısı kaybı olmasını önlemek için kullanılan cihaz.

Numune kalıpları: 100 mm çapında, 63.5 mm yüksekliğinde silindirik bir kalıptır (Şekil 4.35). Üstünde ilave bir kalıp ve altında kalıp taban plakası vardır.

Kriko: Numuneleri kalıplardan düzgün bir şekilde çıkarmaya yarayan düzenek (Şekil 4.36).

Dijital tartı: Numunelerini en az 0.1 gram hassasiyetle tartabilecek bir terazi (Şekil 4.37).

Etüv: Deneyde kullanılan malzemelerin, agregaların ve bitümün istenilen sıcaklıkta tutulmasını sağlar.

Sıcak su banyosu: Kalıptan çıkarılan numuneleri su içerisinde 60 °C' lik bir sıcaklıkta tutmaya yarayan banyo (Şekil 4.38).

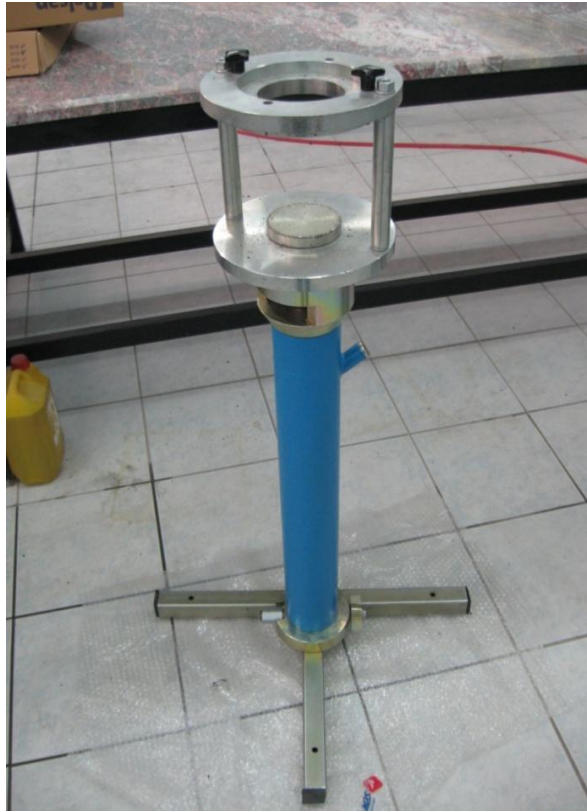
Marshall test cihazı: Marshall briketlerinin stabilitesini ve akmasını ölçmeye yarayan ölçme aleti.



Şekil 4.34 Mikser



Şekil 4.35 Numune kalıpları



Şekil 4.36 Kriko



Şekil 4.37 Digital tartı



Şekil 4.38 Sıcak su banyosu

4.4.1.2. Denevin yapılışı

- Gradasyonu ayarlanmış 1100 gr agrega numunesi (Şekil 4.39) 160 °C' lik etüve bir gün önceden konulur.



Şekil 4.39 Gradasyonu ayarlanmış agrega numuneleri

- Etüvden çıkarılan agrega üzerine, 160 °C' lik etüvden alınan bitüm, terazide hassas bir tartım yapılarak (Şekil 4.40) istenilen miktarda eklenir.



Şekil 4.40 Agrega karışımına bitüm eklenmesi

- Agrega ve bitüm etüvden çıkarılan kaba konularak, mikserde 2 dakika boyunca karıştırılır (Şekil 4.41). Karışımın yapıldığı sırada sıcaklığın düşmemesi için numunenin bulunduğu kap mikser kabı içerisinde tutulur .



Şekil 4.41 Karışımın mikserde karıştırılması

- Numune karıştırıldığı sırada, etüvden çıkarılan numune kalıbının içi fazla olmayacak şekilde yağlanır ve taban kısmına daha önceden uygun boyutlarda kesilmiş yağlı kağıt konulur (Şekil 4.42).

-



Şekil 4.42 Numune kalıbının tabanına konulan yağlı kağıt

- Mikserde karıştırma işlemi biten numune, yine etüvden çıkan bir kürek yardımıyla kalıbımıza konulur (Şekil 4.43). Karışımın boşluksuz olması için, her bir kürekten sonra karışım, etüvden çıkardığımız şişleme çubuğu ile şişlenir (Şekil 4.44). Son olarak üstüne yağlı kağıt konulur.



Şekil 4.43 Karışımın numune kalıbına konulması



Şekil 4.44 Karışımın şişlenmesi

- Kalıp Marshall tokmağı aletine yerleştirilir (Şekil 4.45) ve her iki tarafına 50 vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi tamamlanır.



Şekil 4.45 Karışımın Marshall tokmağında sıkıştırılması

- Tokmaktan çıkarılan kalıp, içerisindeki kağıtlar alındıktan sonra soğuması amacıyla uygun bir yüzey üzerine bırakılır (Şekil 4.46). Bekleme süresi yaklaşık 3 saattir.

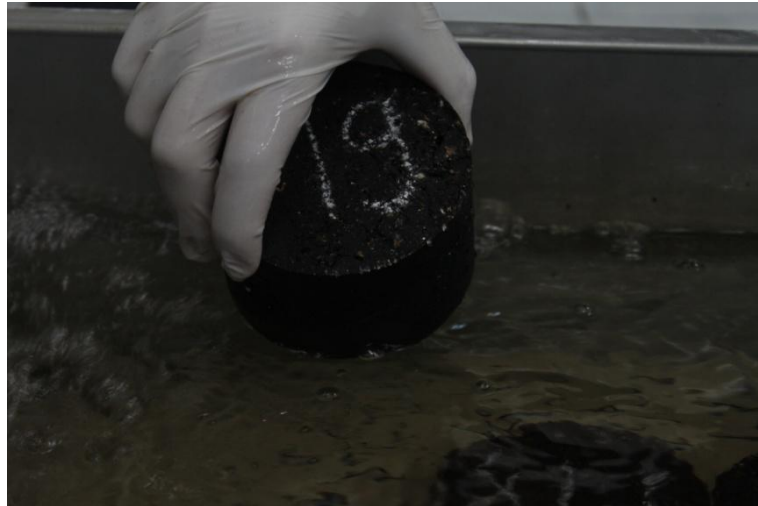


Şekil 4.46 Numuneler

- Briket, soğuyan kalıptan bir krikoyla çıkarılır.
- Krikodan çıkarılan briketler oda sıcaklığında bir gün bekletilir (Şekil 4.47). Daha sonra bu briketler 60 °C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde (Şekil 4.48) 40 dakika tutulur.

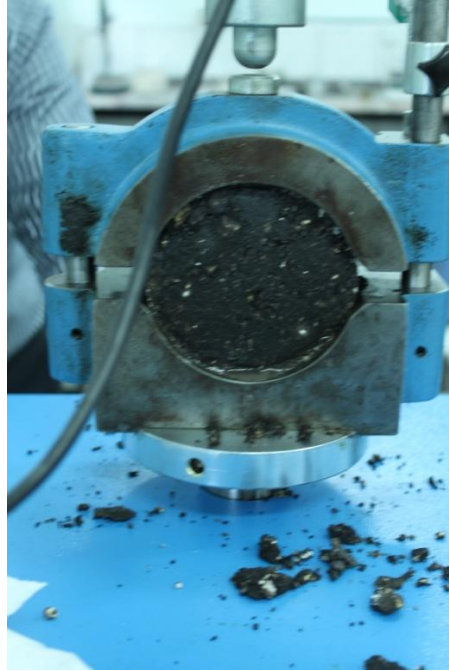


Şekil 4.47 Oda sıcaklığında numuneler



Şekil 4.48 Sıcak su banyosunda numuneler

- Su banyosundan çıkarılan briketler kurulanır ve Marshall test aletine yerleştirilir (Şekil 4.49). Burada briketlerin Marshall stabilite ve akma değerleri hesaplanır (Şekil 4.50), (Özen,2005).



Şekil 4.49 Marshall test cihazı



Şekil 4.50 Numunenin stabilite ve akma değerleri

4.4.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

Ölçme aletinde, Flowmetreden akma, Dialgeyçten stabilite okunur. Briketlerimizin yükseklikleri ölçülür ve bu yüksekliklere bağlı olarak sonuçlar düzeltme faktörleri ile çarpılarak stabilite değerleri bulunur.

Optimum bitüm muhtevasının tayini için farklı bitüm yüzdeleri ile hazırlanmış numunelerin Marshall stabilitesi, boşluk oranı, pratik özgül ağırlığı, bitümle dolu boşluk oranı, mineral agregadaki boşluk oranı ve Marshall akma değerleri bulunup grafikleri çizilir. Marshall stabilitesini maksimum yapan bitüm oranı, boşluk oranını % 4 yapan bitüm oranı, pratik özgül ağırlığı maksimum yapan bitüm oranı ve bitümle dolu boşluk oranını % 70 yapan bitüm oranı grafikler yardımı ile bulunur. Bu değerleri ortalaması çalışmanın ileriki aşamalarında kullanacağımız optimum bitüm yüzdesini verecektir. Bu aşamada iki yöntem kullanılabilir. Birinci yöntemde, tespit edilen 4 değerlerin ortalaması alınır. İkinci yöntemde ise bitümle dolu boşluk oranı dışarıda bırakılarak 3 değerlerin ortalaması alınır. Bulunan optimum bitüm yüzdesi akma – bitüm oranı grafiğinde yerine konularak, şartname değerleri (2-4 mm) içerisinde kalan kısma denk gelip gelmediği kontrol edilir.

Çalışmada optimum bitüm yüzdesini belirlemek için, % 3.5 – 6.5 aralığında % 0.5 arttırmak sureti ile 7 farklı bitüm oranı kullanılmıştır. Her bitüm oranından 3 adet numune üretilmiştir. 3 seri ile yapılan çalışmada toplam 63 numune kullanılarak Çizelge 4.34'te gösterilen asfalt betonu dizayn kriterleri çerçevesinde optimum bitüm oranı hesaplanmıştır.

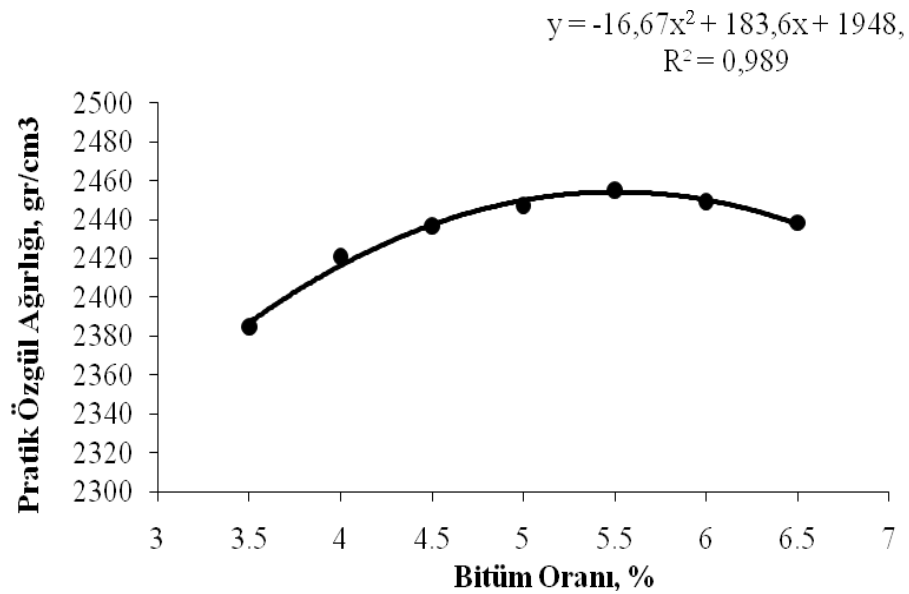
Çizelge 4.34 Aşınma tabakası asfalt betonu dizayn kriterleri (KTŞ, 2006)

ÖZELLİKLER	Minimum	Maksimum
Marshall Stabilitesi, Kg	900	-
Boşluk, %	3	5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	65	75
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	14	-
Akma, mm	2	4
Filler/Bitüm Oranı	-	1.5
Bitüm (Ağırlıkça)	4.0	7.0

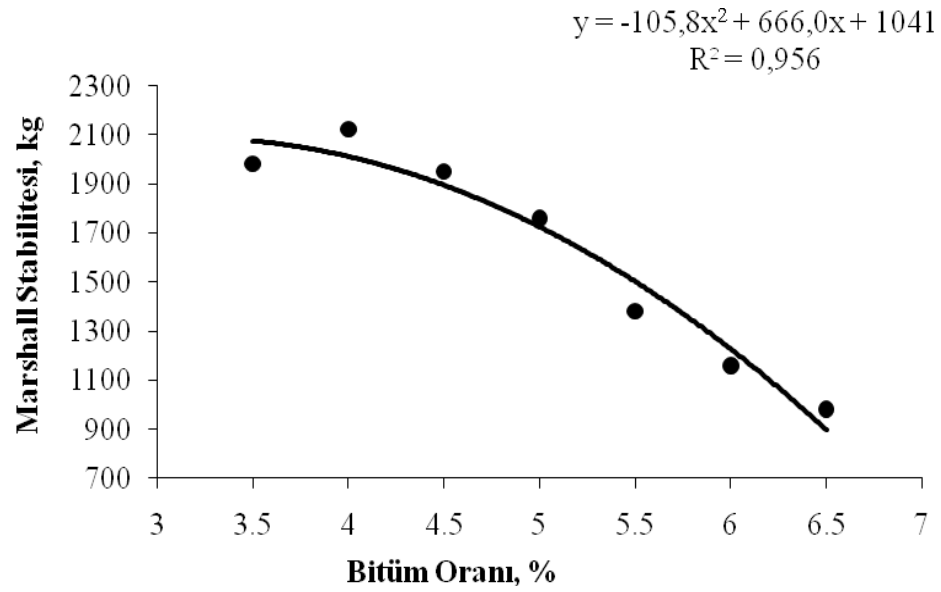
4.4.1.4. Kontrol numunelerine uygulanan marshall deney sonuçları

Çizelge 4.35 Kontrol numuneleri deney sonuçları

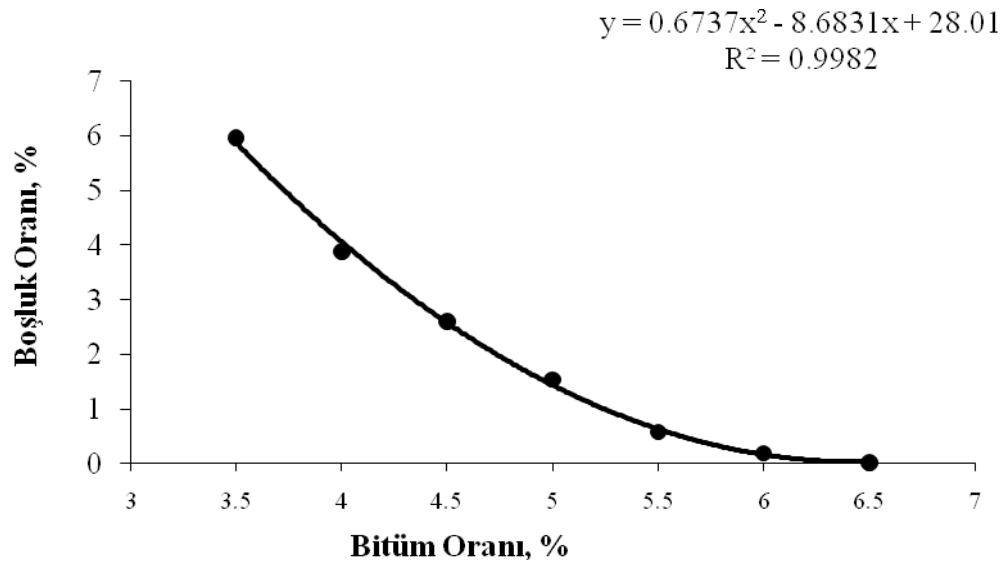
50-70	Bitüm Oranı (%)	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ
1	3.5	13.67	56.17	5.96	2384.73	1980.77	2.02	1023.06
2	4	12.78	69.38	3.88	2420.93	2121.94	2.46	885.46
3	4.5	12.63	79.12	2.61	2436.78	1950.62	2.72	720.75
4	5	12.67	87.59	1.54	2447.28	1761.09	2.25	799.40
5	5.5	12.80	95.21	0.58	2455.26	1380.60	2.67	532.25
6	6	13.43	98.34	0.19	2449.29	1158.10	3.00	387.02
7	6.5	14.22	99.67	0.02	2438.27	982.30	4.05	242.84



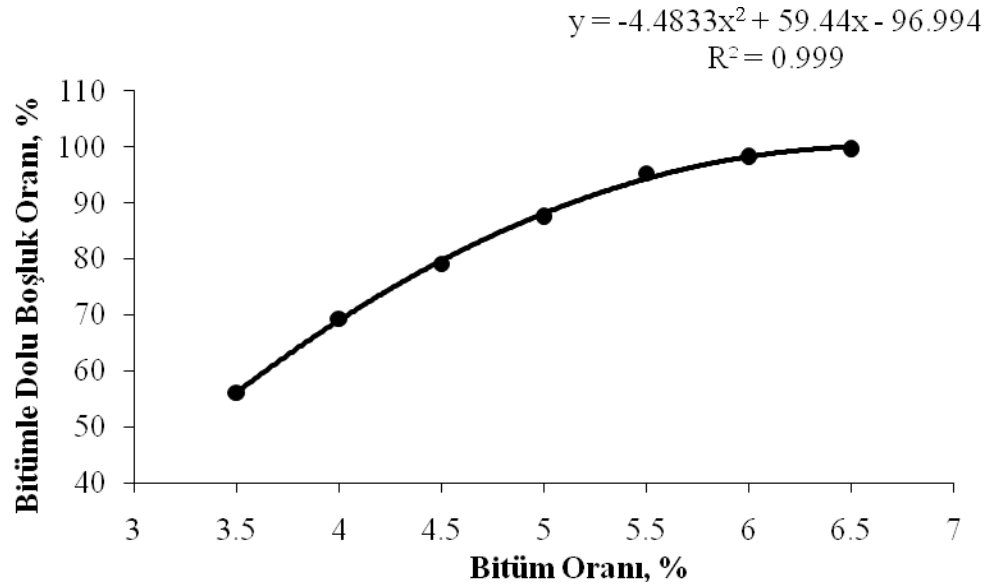
Şekil 4.51 Kontrol numuneleri bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği



Şekil 4.52 Kontrol numuneleri Bitüm oranı- marshall stabilesi grafiği



Şekil 4.53 Kontrol numuneleri bitüm oranı- boşluk oranı grafiği



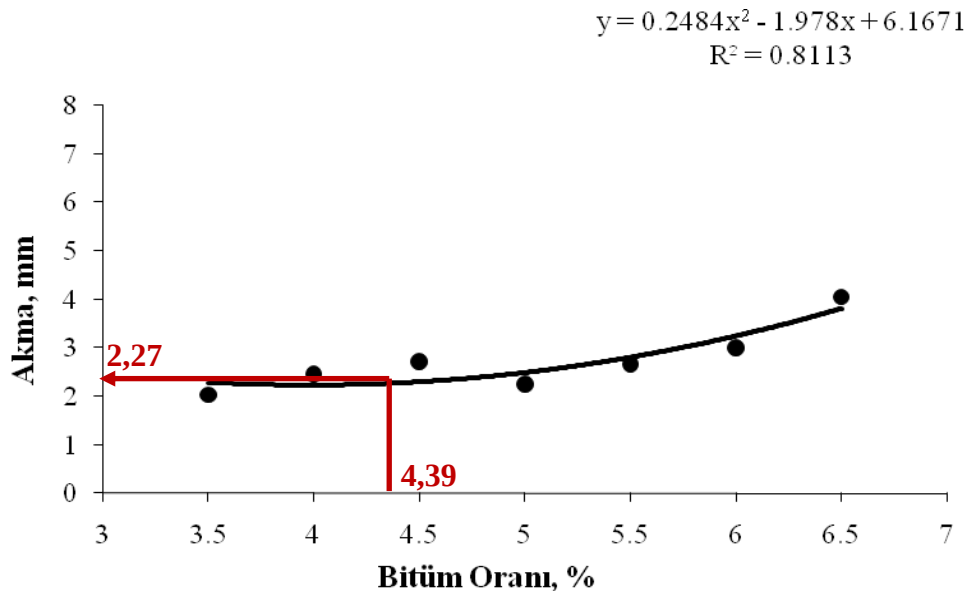
Şekil 4.54 Kontrol numuneleri bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı grafiği

Yukarıda verilen 4 grafikten faydalanılarak Çizelge 4.36’da bu dört değişkene göre ortalama alınarak en uygun asfalt oranı **% 4.39** olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.36 Kontrol numuneleri için ortalama bitüm oranı

Deney Adı	Bitüm Oranı (%)
Pratik özgül ağırlık(en yüksek)	5.51
Marshall Dayanımı(en yüksek)	4.00
Boşluk oranı(%4)	4.02
Bitümle dolu boşluk oranı(%70)	4.04
ORTALAMA	4.39

Asfalt oranı % 4.39’ e karşılık gelen akma değeri Şekil 4.55’te verildiği üzere 2.27 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.55 Kontrol numuneleri bitüm oranı- akma grafiği

En uygun asphalt oranı % 4.39 için grafiklerden elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.37’de verilmiştir.

Çizelge 4.37 Kontrol numuneleri için en uygun asphalt oranına göre deney sonuçları

Deney Adı	Deney Sonuçları
Pratik özgül ağırlık, kg/m^3	2433.48
Marshall Dayanımı, kg	1900.6
Boşluk oranı, %	2.9
Bitümle dolu boşluk oranı, %	77.6
Akma, mm	2.27

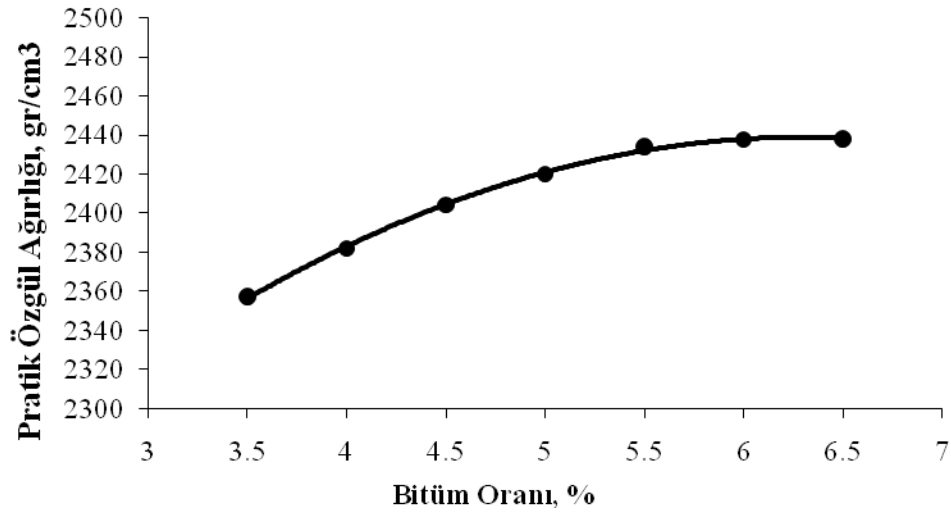
4.4.1.5. CRM-300 Katkılı numunelere uygulanan marshall deney sonuçları

Çizelge 4.38 CRM-300 katkıli numunelerin deney sonuçları

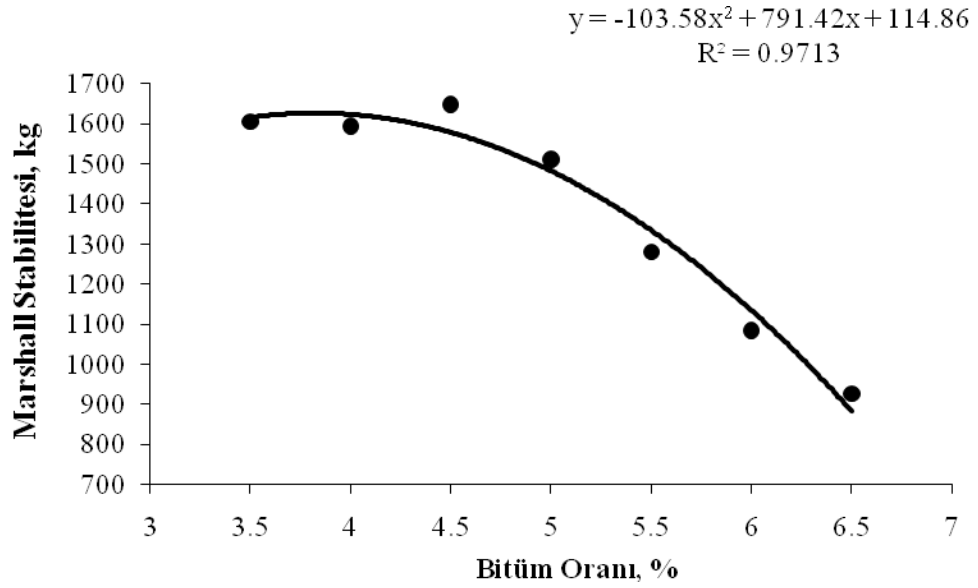
50-70	Bitüm Oranı (%)	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ
1	3.5	14.67	51.77	7.05	2357.20	1605.32	1.90	870.04
2	4	14.18	61.60	5.43	2382.08	1593.91	1.81	891.97
3	4.5	13.80	71.45	3.91	2404.19	1648.71	1.69	997.01
4	5	13.65	80.44	2.64	2420.05	1512.03	1.84	828.66
5	5.5	13.55	89.21	1.44	2434.18	1280.97	2.45	525.16
6	6	13.83	95.03	0.66	2437.86	1084.67	2.92	371.95
7	6.5	14.23	99.61	0.02	2438.07	927.09	3.62	259.14

$$y = -10.426x^2 + 131.7x + 2023.1$$

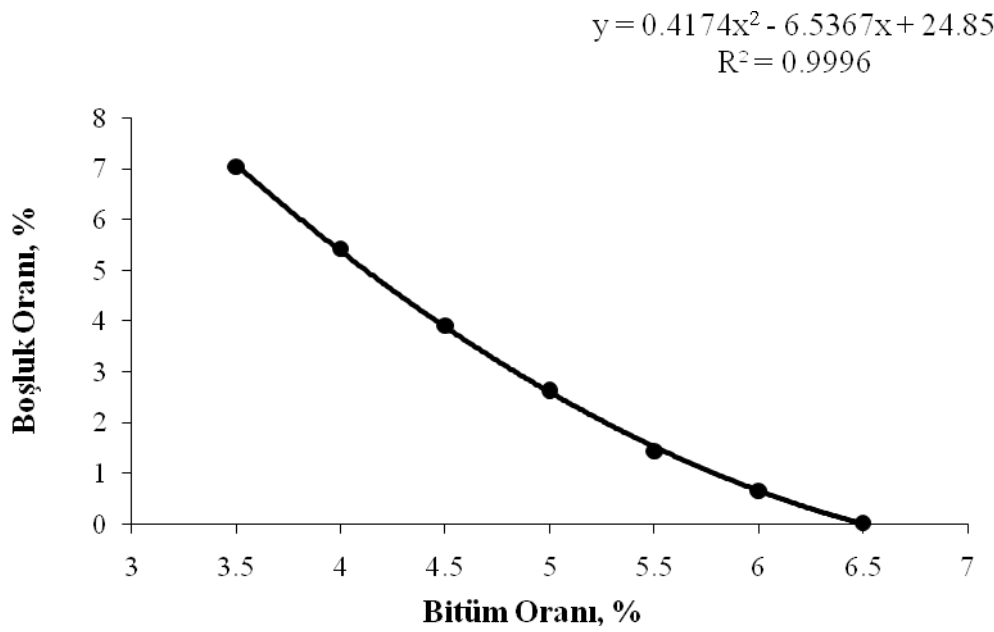
$$R^2 = 0.9987$$



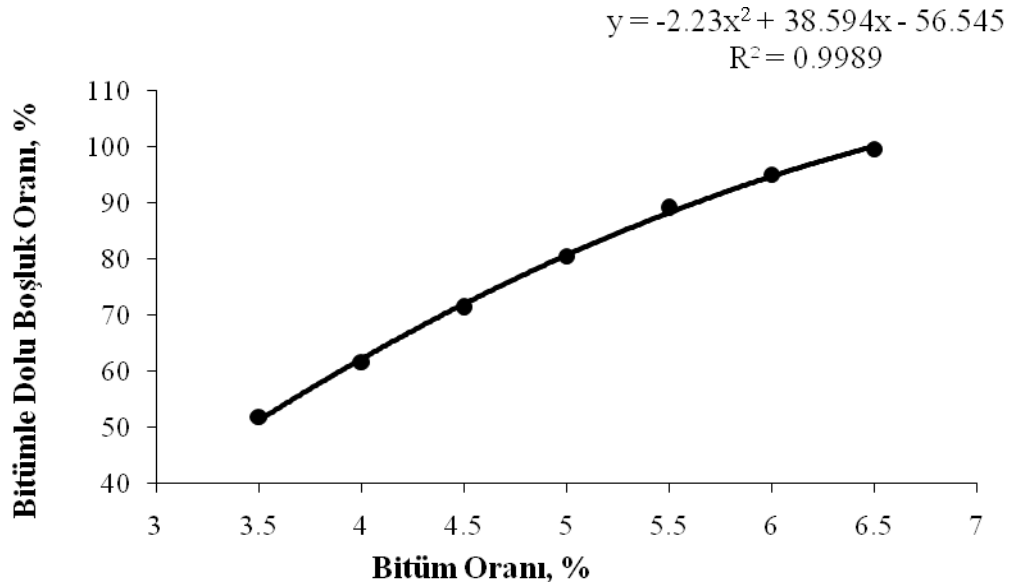
Şekil 4.56 CRM-300 katkıli numunelerin bitüm oranı- pratik özgöl ağırlık grafiği



Şekil 4.57 CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- marshall Stabilesi grafiği



Şekil 4.58 CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- boşluk oranı grafiği



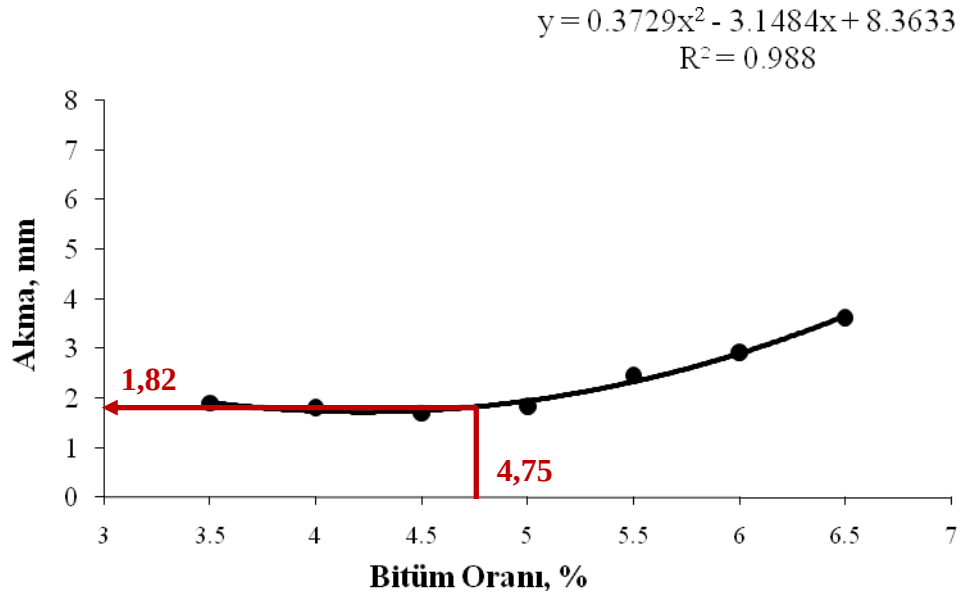
Şekil 4.59 CRM-300 katkılı numunelerin bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı grafiği

Yukarıda verilen 4 grafikten faydalanılarak Çizelge 4.39’da bu dört değişkene göre ortalama alınarak en uygun asfalt oranı **% 4.75** olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.39 CRM-300 katkılı numuneler için ortalama bitüm oranı

Deney Adı	Bitüm Oranı (%)
Pratik özgül ağırlık(en yüksek)	6.32
Marshall Dayanımı(en yüksek)	3.82
Boşluk oranı(%4)	4.46
Bitümle dolu boşluk oranı(%70)	4.39
ORTALAMA	4.75

Asfalt oranı % 4.75’ e karşılık gelen akma değeri Şekil 4.60’da verildiği üzere 1.82 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.60 CRM-300 katkılı numunelerin akma –bitüm oranı değişimi

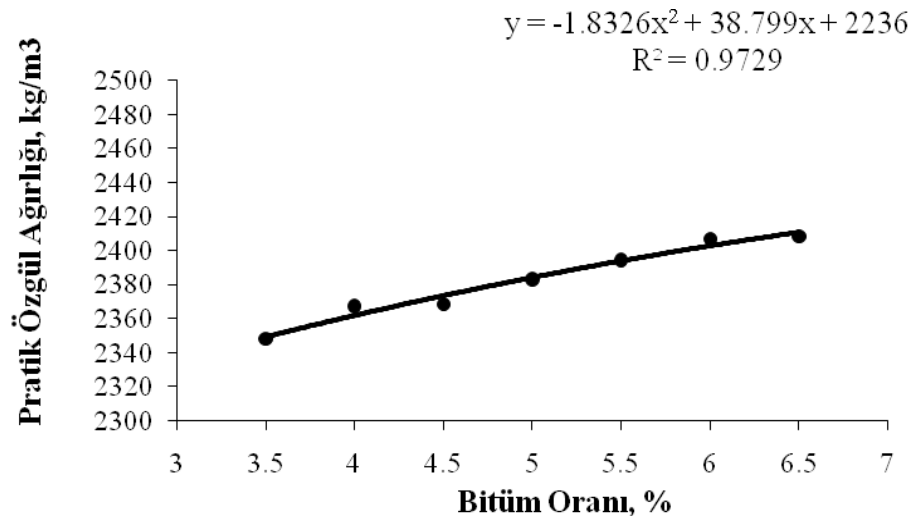
Çizelge 4.40 CRM-300 katkılı numuneler için en uygun asfalt oranına göre deney sonuçları

Deney Adı	Deney Sonuçları
Pratik özgül ağırlık, kg/m ³	2413.36
Marshall Dayanımı, kg	1650.0
Boşluk oranı, %	3.2
Bitümle dolu boşluk oranı, %	76.4
Akma, mm	1.82

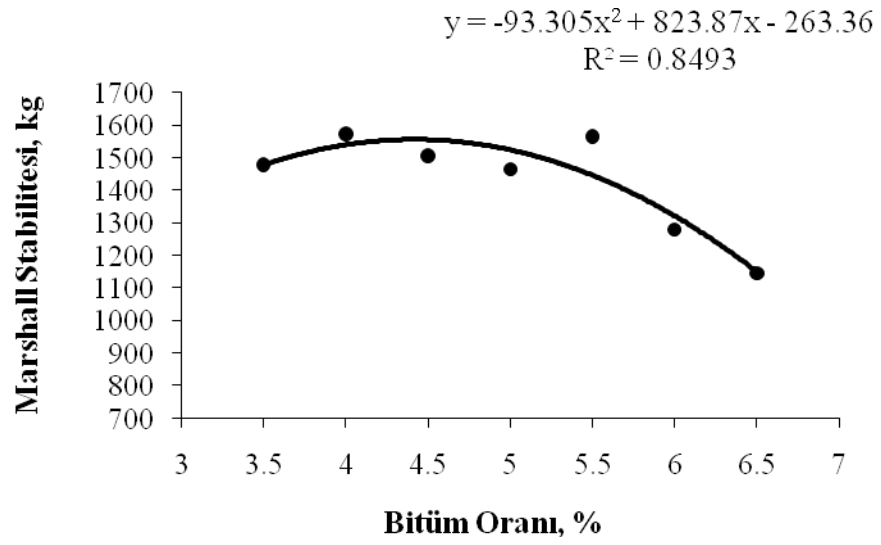
4.4.1.6. SMR-400 katkılı numunelere uygulanan marshall deney sonuçları

Çizelge 4.41 SMR-400 katkılı numunelerin deney sonuçları

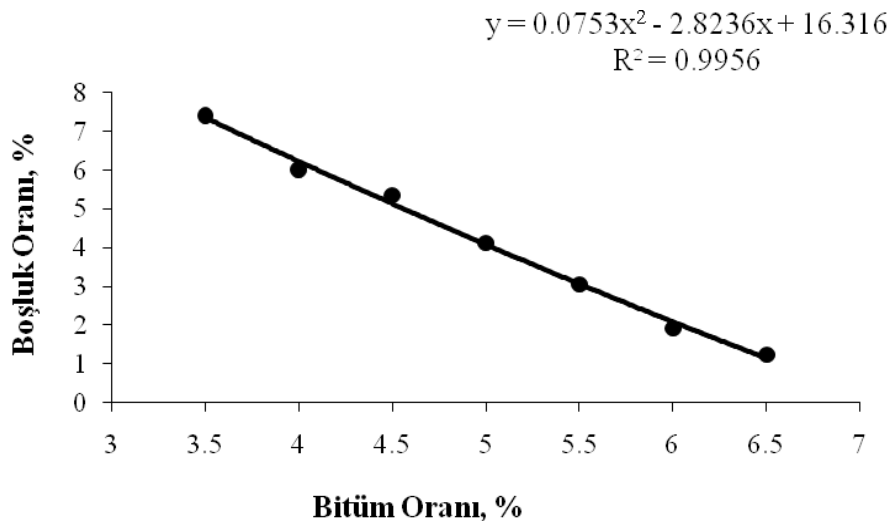
50-70	Bitüm Oranı (%)	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Marshall Stabilite (kg)	Akma
1	3.5	15.00	50.44	7.41	2348.00	1478.12	1.74
2	4	14.71	59.00	6.01	2367.40	1572.70	2.02
3	4.5	15.09	64.40	5.34	2368.32	1505.82	1.94
4	5	14.96	72.24	4.12	2383.15	1465.17	1.92
5	5.5	14.96	79.50	3.04	2394.47	1564.90	2.12
6	6	14.92	86.96	1.92	2406.89	1279.26	2.27
7	6.5	15.27	91.70	1.24	2408.50	1144.57	2.56



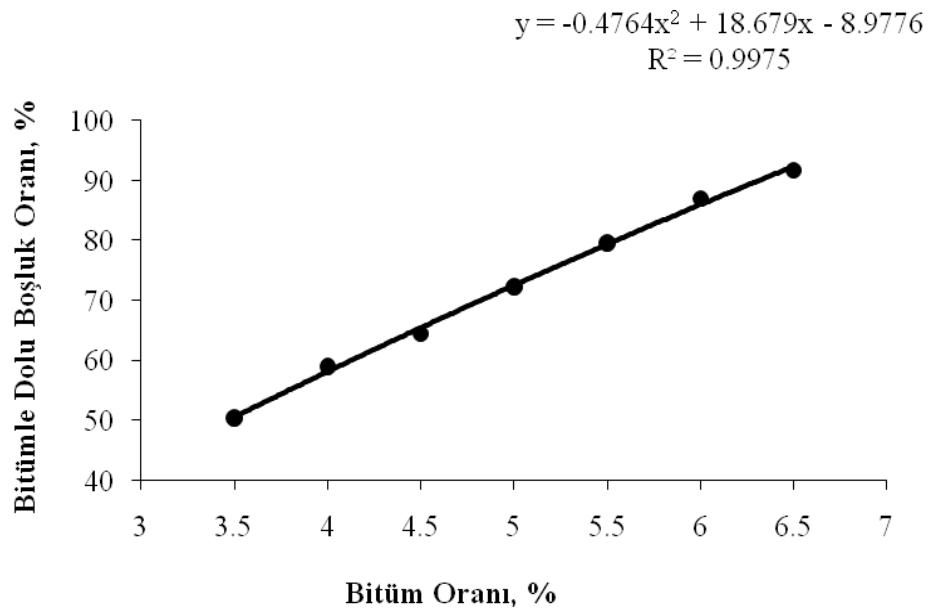
Şekil 4.61 SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği



Şekil 4.62 SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- marshall stabilesi grafiği



Şekil 4.63 SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- boşluk oranı grafiği



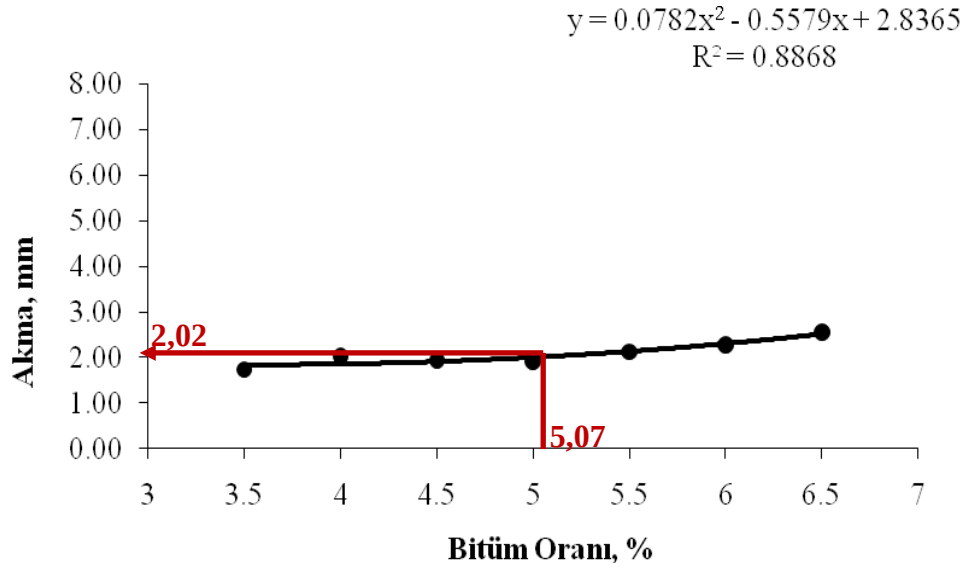
Şekil 4.64 SMR-400 katkılı numunelerin bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı grafiği

Yukarıda verilen 4 grafikten faydalanılarak Çizelge 4.42’de bu dört değişkene göre ortalama alınarak en uygun asfalt oranı **% 5.07** olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.42 SMR-400 katkılı numuneler için ortalama bitüm oranı

Deney Adı	Bitüm Oranı (%)
Pratik özgül ağırlık (en yüksek)	6.00
Marshall Dayanımı (en yüksek)	4.41
Boşluk oranı (%4)	5.04
Bitümle dolu boşluk oranı (%70)	4.82
ORTALAMA	5.07

Asfalt oranı % 5.07 e karşılık gelen akma değeri Şekil 4.65’de verildiği üzere **2.02 mm** olarak bulunmuştur.



Şekil 4.65 SMR-400 katkılı numunelerin akma –bitüm oranı grafiği

En uygun asfalt oranı % 5.07 için grafiklerden elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.43'te verilmiştir.

Çizelge 4.43 SMR-400 katkılı numuneler için en uygun asfalt oranına göre deney sonuçları

Deney Adı	Deney Sonuçları
Pratik özgül ağırlık, kg/m ³	2385.58
Marshall Dayanımı, kg	1515.4
Boşluk oranı, %	3.9
Bitümle dolu boşluk oranı, %	73.5
Akma, mm	2.02

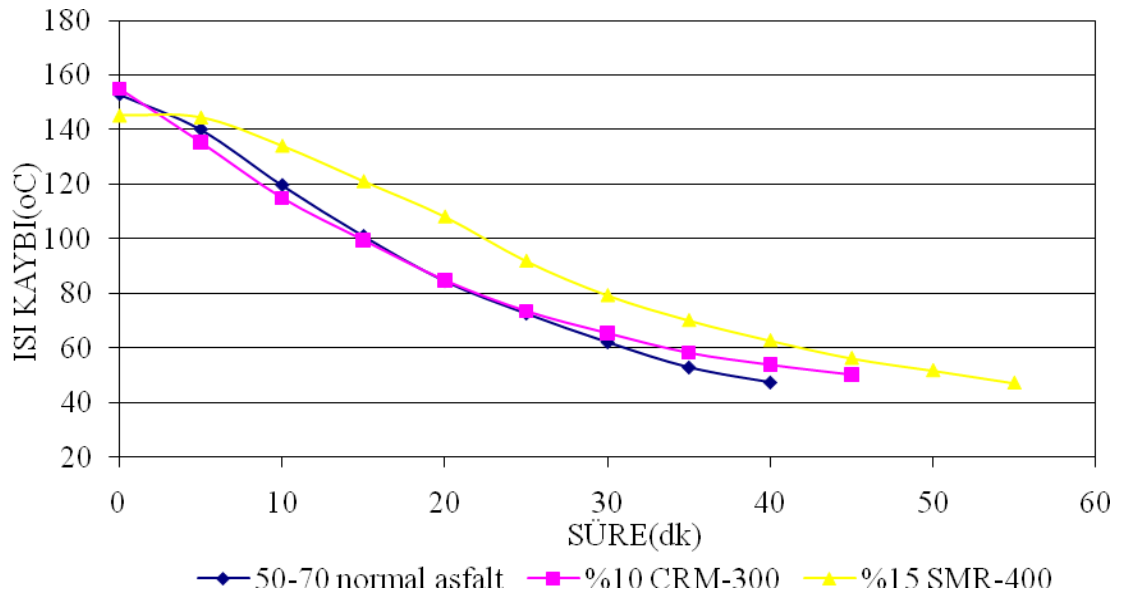
4.4.1.7. Marshall deneyi toplu sonuçları

Çizelge 4.44 Marsall deneyi toplu sonuçları

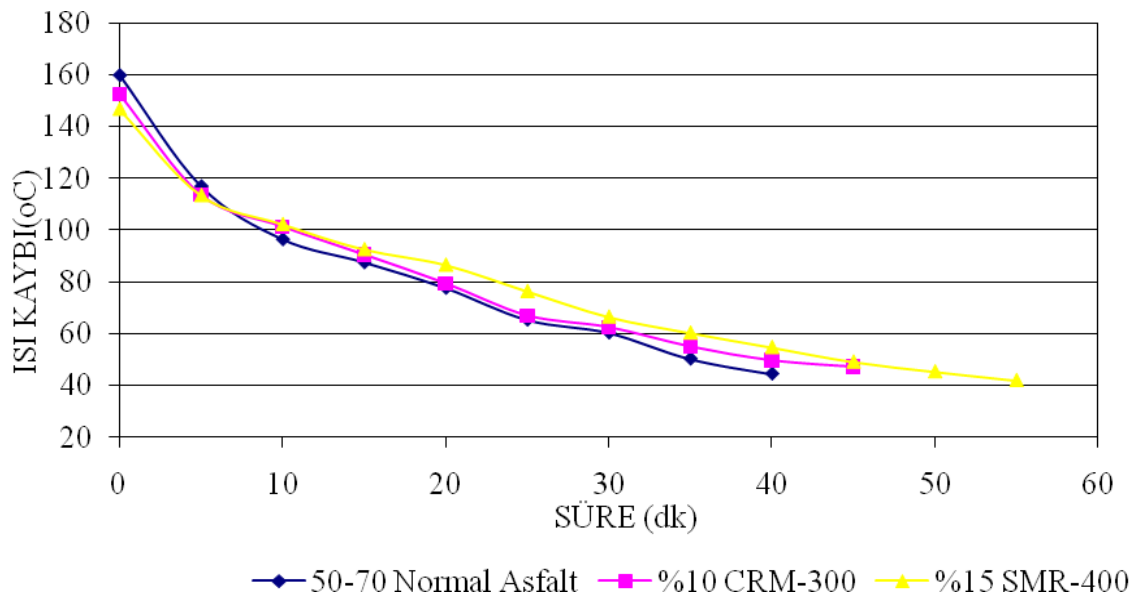
Deney Adı		Bitüm Oranı (%)		
		Kontrol	CRM-300	SMR-400
Pratik özgül ağırlık(en yüksek)		5.51	6.32	6.00
Marshall Dayanımı(en yüksek)		4.00	3.82	4.41
Boşluk oranı(%4)		4.02	4.46	5.04
Bitümle dolu boşluk oranı(%70)		4.04	4.39	4.82
ORTALAMA		4.39	4.75	5.07
Opt. bitüm oranı için	Pratik özgül ağırlık, kg/m ³	2433.48	2413.36	2385.58
	Marshall Dayanımı, kg	1900.6	1650.0	1515.4
	Boşluk oranı, %	2.9	3.2	3.9
	Bitümle dolu boşluk oranı, %	77.6	76.4	73.5
	Akma, mm	2.27	1.82	2.02

4.4.2. Isı kaybı deneyi

CMR-300 ve SMR-400 katkı maddelerinin en önemli özelliklerinden biri ısıtma etkisi ile sahip olduğu ısıtma enerjisini daha geç kaybetmeleridir. 50-70 asfalt, CMR-300 ve SMR-400 katkılı agrega asfalt karışımları için ısı kaybı deneyleri uygulanmıştır. 50-70 asfalt, %10 CRM-300 ve %15 SMR-400 için elde edilen deney sonuçları karışım içi ve yüzey sıcaklık ölçümleri sırasıyla Şekil 4.66 ve Şekil 4.67’de verilmiştir.



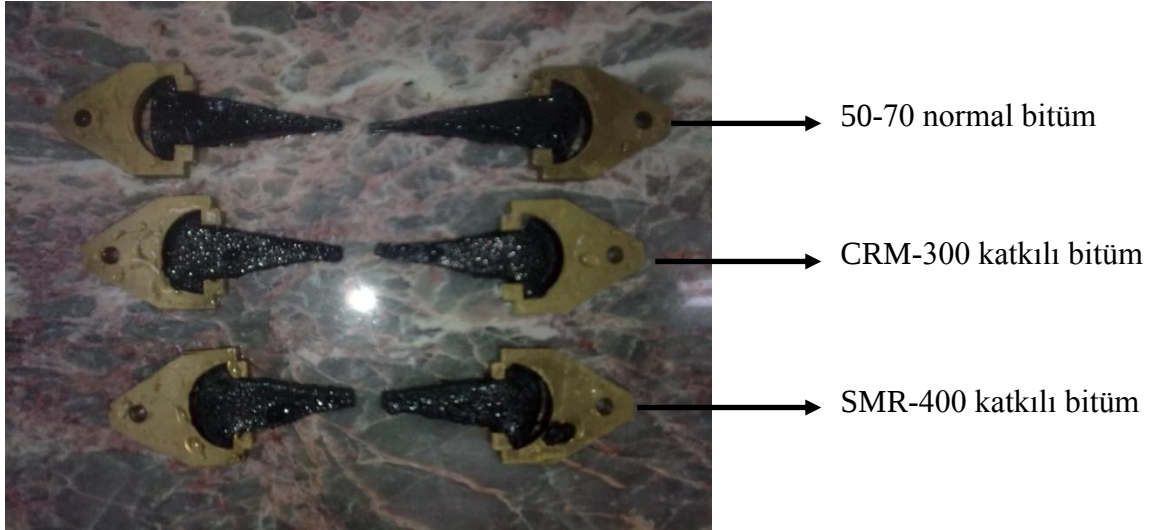
Şekil 4.66 Isı kaybı değişimi(numune içi).



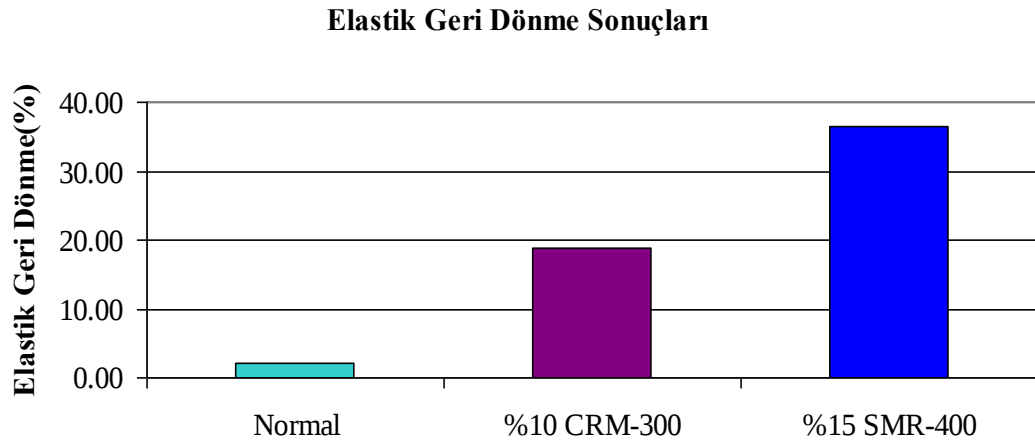
Şekil 4.67 Isı kaybı değişimi(numune yüzeyi).

4.4.3. Elastik geri dönme deneyi

Karışım deney numuneleri belirli miktarda uzatılıp (10 cm), serbest bırakılmasından sonra geriye dönen deformasyon miktarları ölçülmüştür. Deney için düktilite aleti kullanılmıştır. Deney hızı 5 cm/dak dır. 10 cm uzama ardından deney numuneleri Şekil 4.68’de görüleceği üzere 60 dk. bekletilmiş ve geri dönüşüm oranları tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları aşağıdaki Şekil 4.68’de verilmiştir. Bu deney 50-70 normal asfalt, %10 CRM-300 ve %15 SMR-400 katkılı asfalt deney numuneleri için ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 4.68 Numunelerin elastik geri dönme deney sonuçları



Şekil 4.69 Elastik geri dönüş değerleri.

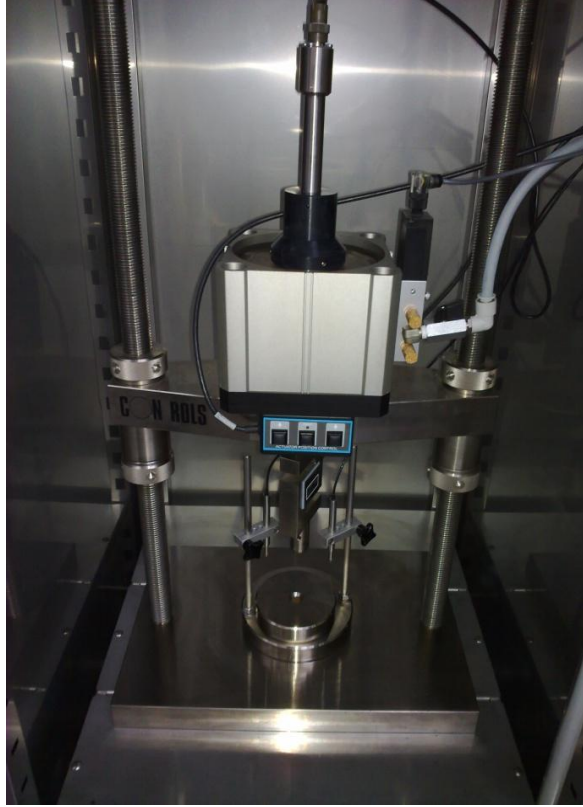
4.4.4. Sünme deneyleri

Sünme deneyi belirli sayıdaki vuruş miktarına göre asfalt numunede meydana gelen kalıcı deformasyonların ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Deneysel çalışmalar 160°C sıcaklık için 24, 120°C sıcaklık için 24 olmak üzere, toplam 48 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.4.4.1. Kullanılan aletler



Şekil 4.70 İklimlendirme kabini



Şekil 4.71 Yüklem seti



Şekil 4.72 Veri işlemci, Bilgisayar



Şekil 4.73 Kompresör

4.4.4.2. UTS Cihazı

Deney aleti (Şekil 4.71) ortalama 810.6kPa (8 atm) basınç ile çalışmaktadır. 200 lt kapasiteli hava basınç kompresörü (Şekil 4.73) ile desteklenmektedir. Yükleme sistemi ile kompresör arasında ayrıca ek bir depolayıcı mevcuttur. Yükleme sistemi iklimlendirme kabini içerisinde (Şekil 4.70) bulunmaktadır. İklimlendirme kabini çeşitli sıcaklık derecelerinde (0 ila +60 °C dahil) deney uygulamasına imkan sağlamaktadır. Ana yükleyici ve LVDT ler yük uygulaması sonucunda numune üzerinde meydana gelen deformasyonları ayrı ayrı ölçebilme özelliğine sahiptir. Elde edilen sonuçlar yükleme sistemine bağlı veri işlemci (Şekil 4.72) vasıtasıyla depolanabilmekte ve bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir. Çalışmada deformasyonlar % 10 ile sınırlı tutulmuştur.

Deneyde kullanılan numunelere n yükleme sonunda birikmiş eksenel birim şekil değiştirme aşağıda verilen formülle hesaplanabilir.

$$\varepsilon_n = 100 \left(\frac{h_0 - h_n}{h_0} \right)$$

formülde;

$\varepsilon = n$ yükleme sonunda numunede birikmiş aksenal birim şekil değıştirme (%)

h_0 = Başlangıç numune ortalama yüksekliğı

h_n = n yüklemeden sonraki numune ortalama yüksekliğini gösterir.

Sünme hızı f_c ;

$$f_c = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2}$$

formülü ile hesaplanır. Burada;

f_c = Sünme hızı (birim şekil değıştirme/vuruş sayısı)

$\varepsilon_{n1,n2} = n_1, n_2$ yükleme sonunda numunede birikmiş aksenal birim şekil değıştirme (%)

n_1, n_2 = Tekrarlı yük uygulamaları sayısıdır.

n yükleme sonunda sünme modülü aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

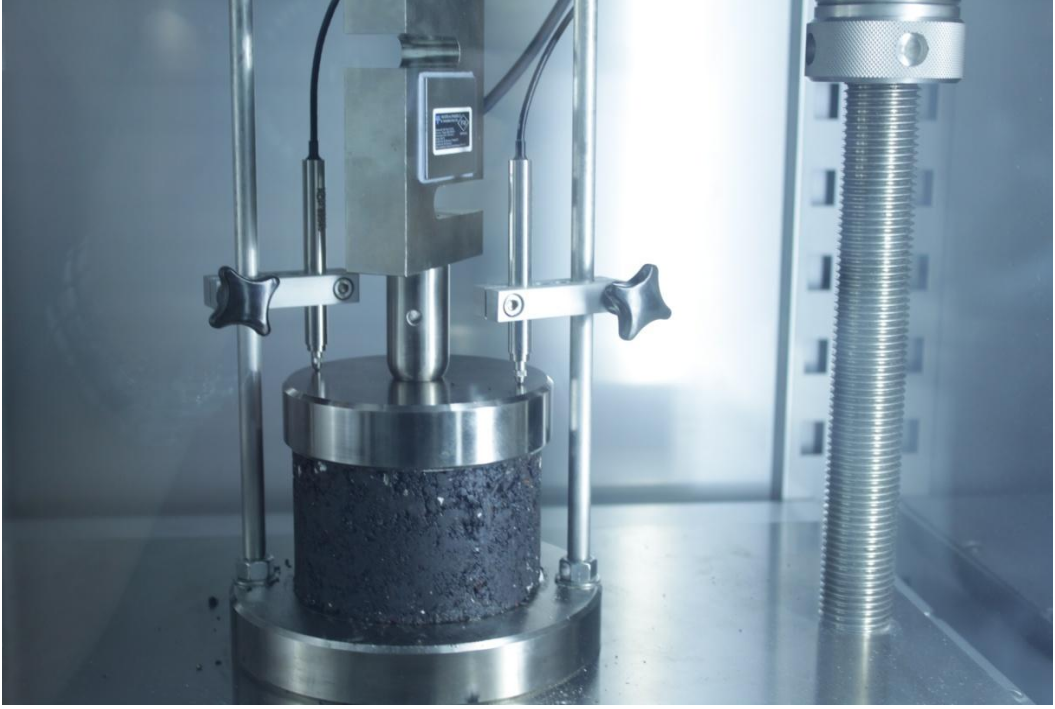
$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} * 1000$$

Burada;

E_n = n yükleme sonunda sünme modülü (MPa)

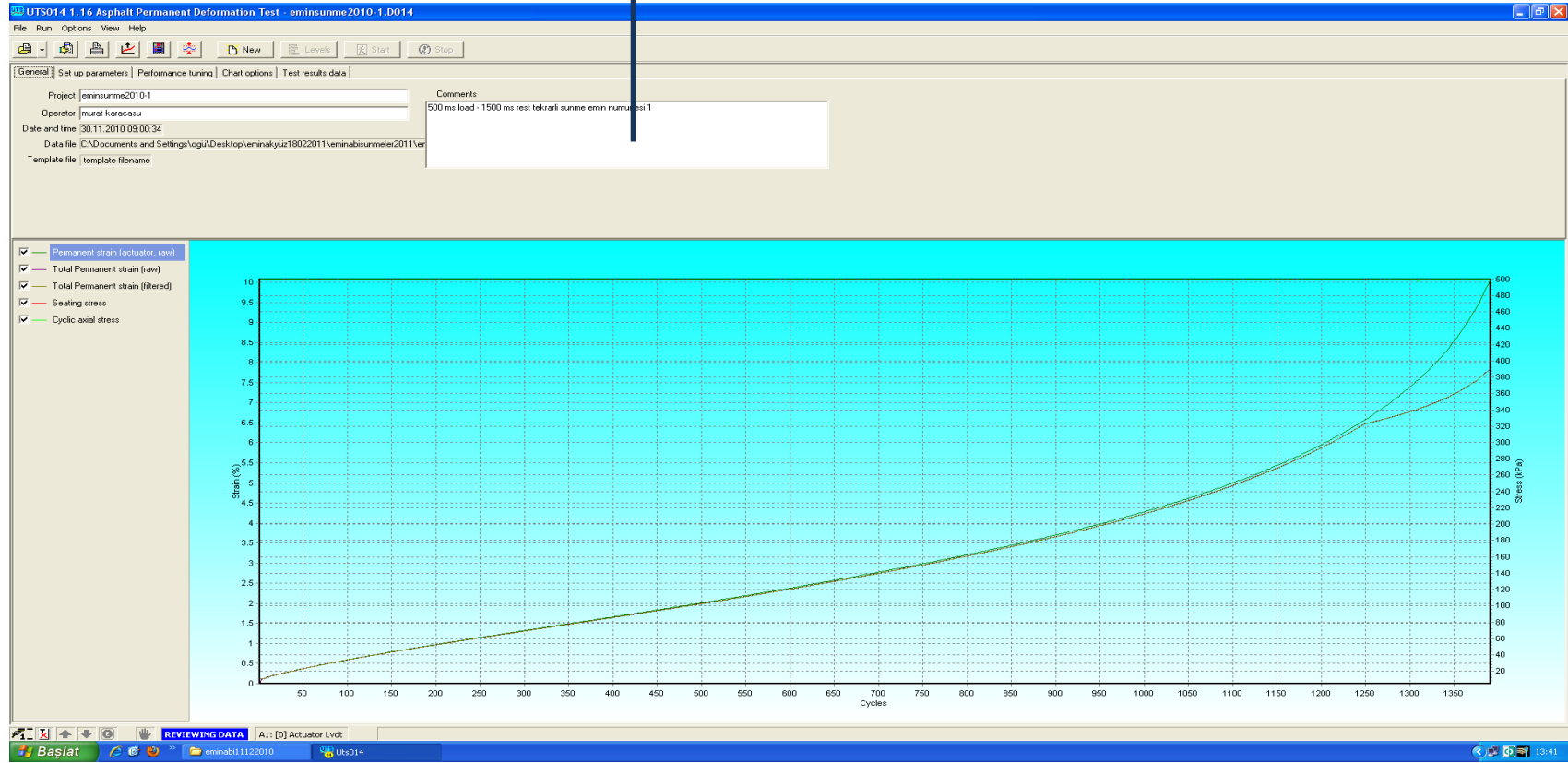
σ = Yüklenen gerilme (kPa)

ε_n = n yükleme sonunda numunede birikmiş aksenal birim şekil değıştirme (%)

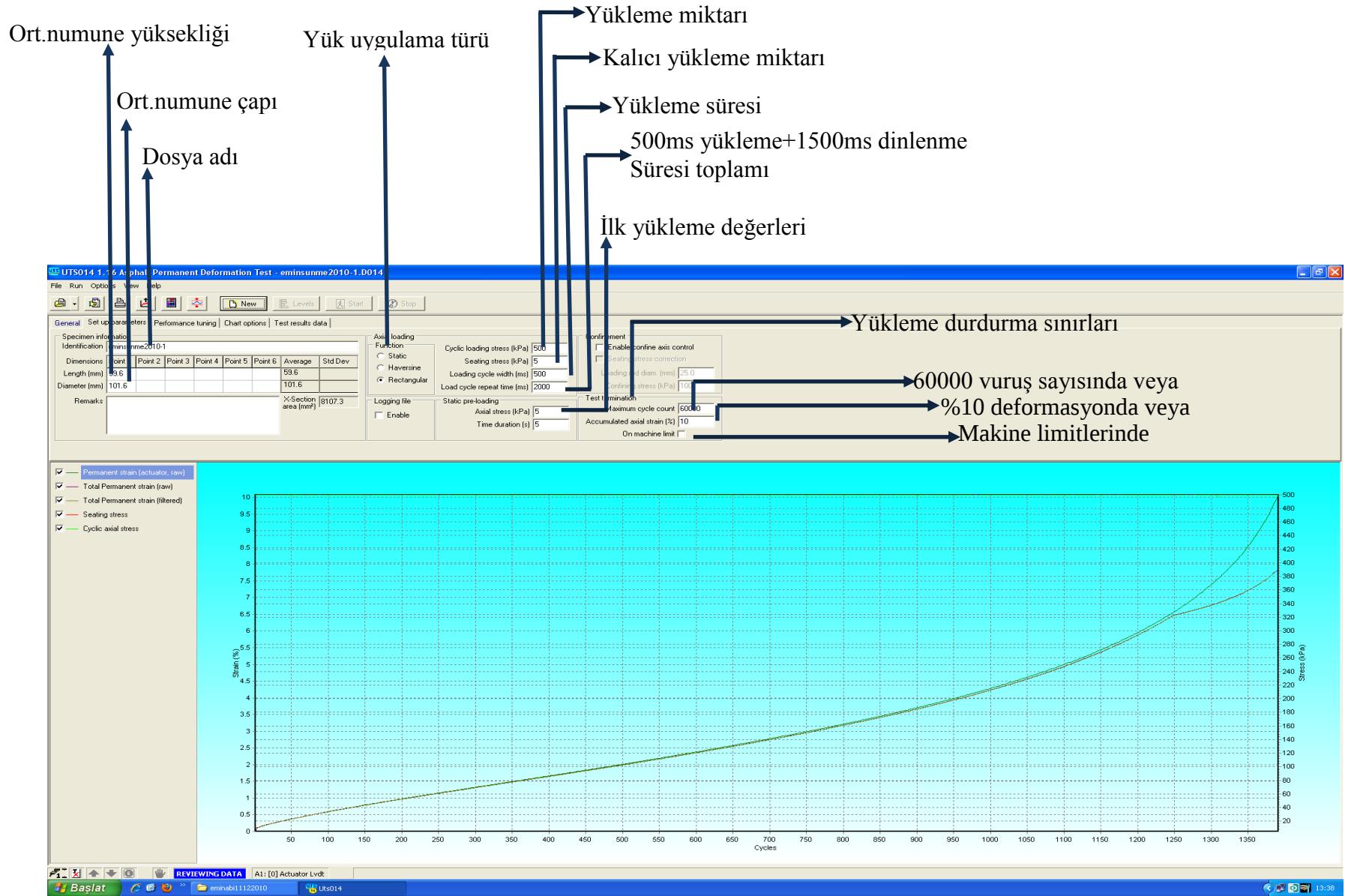


Şekil 4.74 Sünme deney aleti içerisinde test numunesi

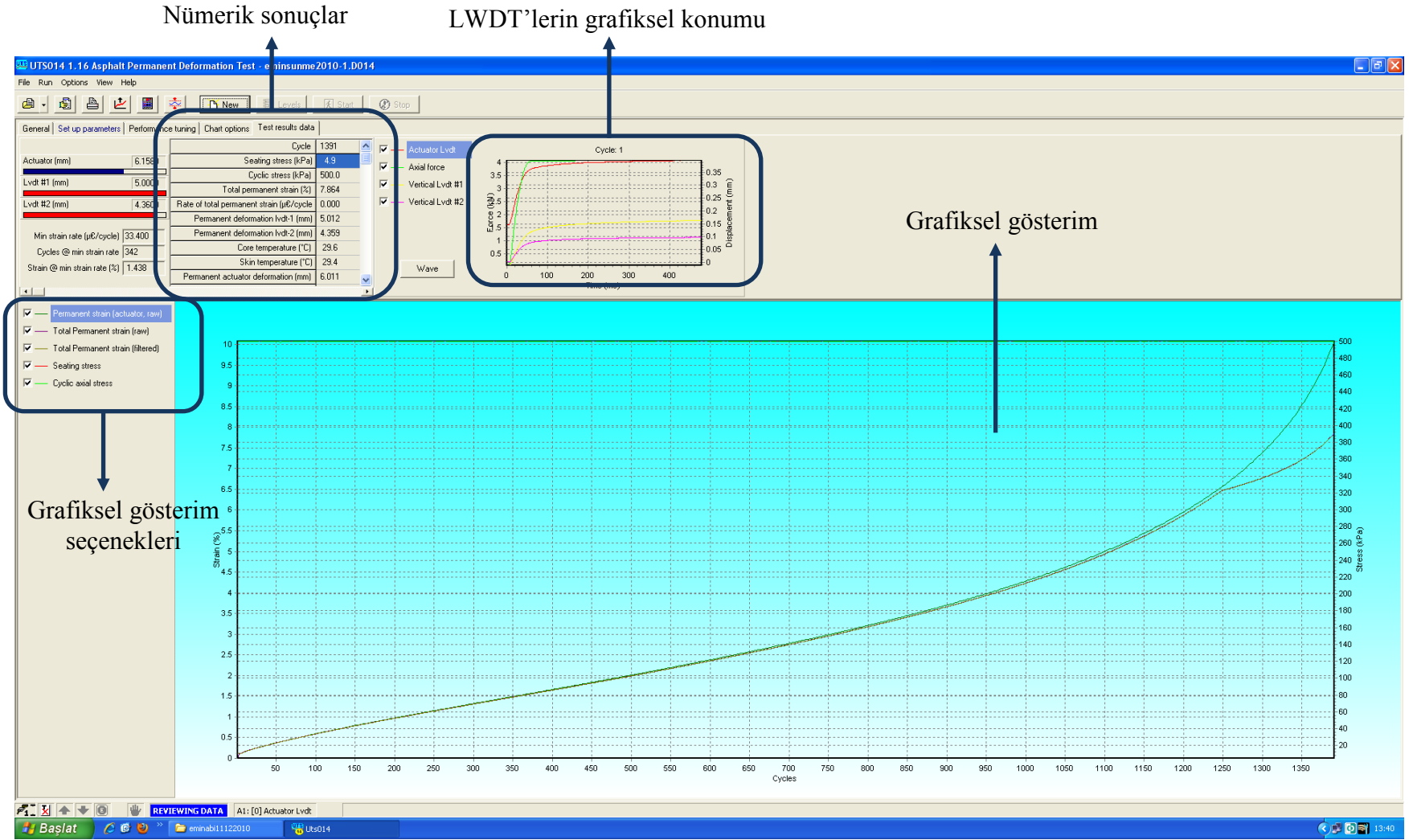
Test ile ilgili açıklamaların yazıldığı alandır



Şekil 4.75 UTS cihazı bilgisayar programı “general” sekmesi

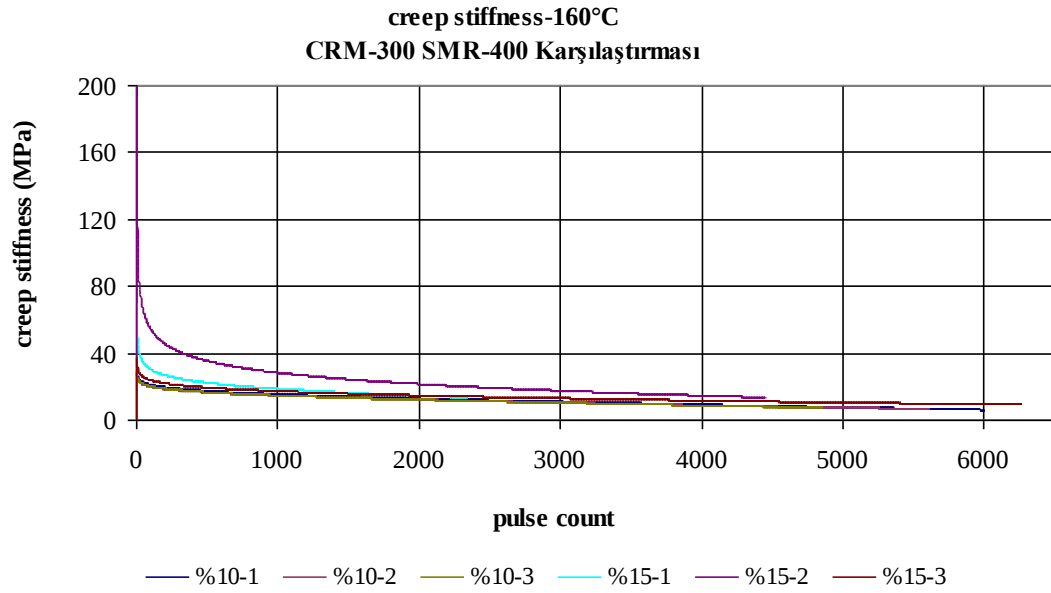


Şekil 5.76 UTS cihazı bilgisayar programı “set up parameters” sekmesi

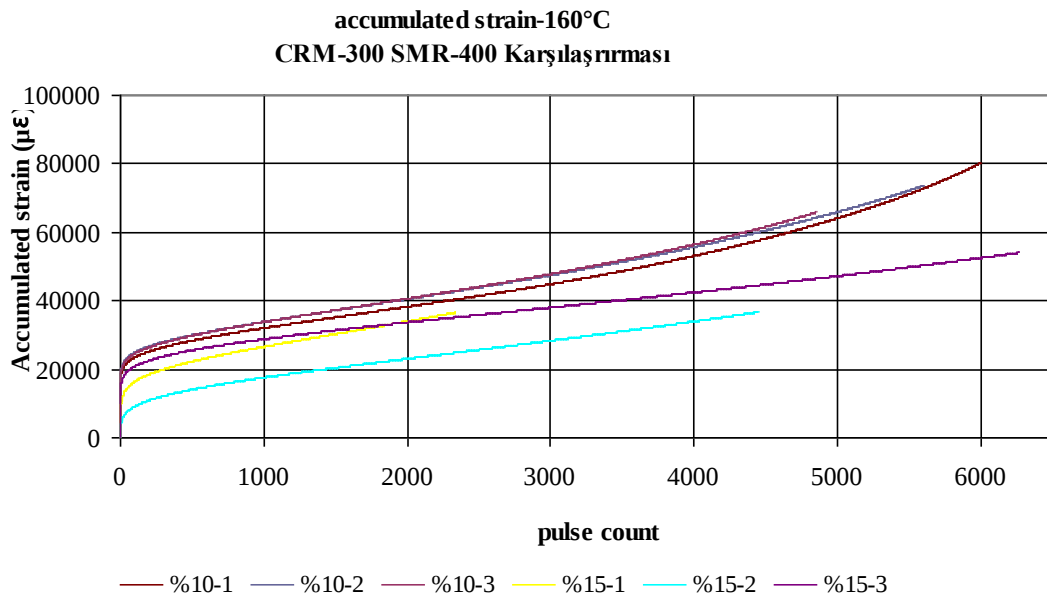


Şekil 4.77 UTS cihazı bilgisayar programı “Test results data” sekmes

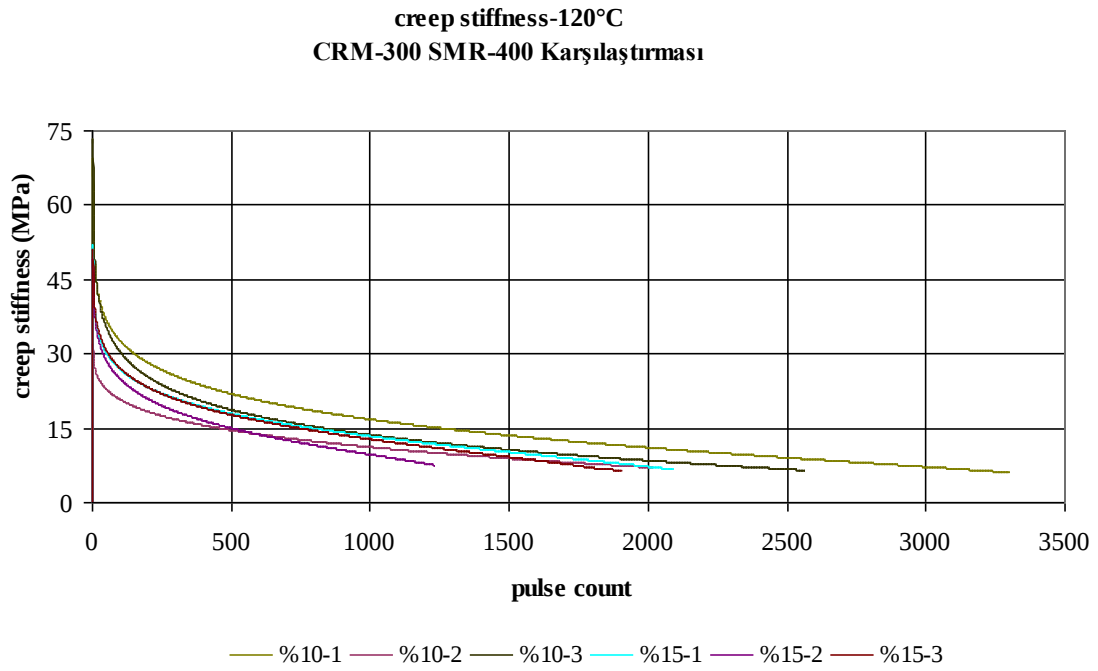
4.4.4.3. Dinamik sünme deney sonuçları



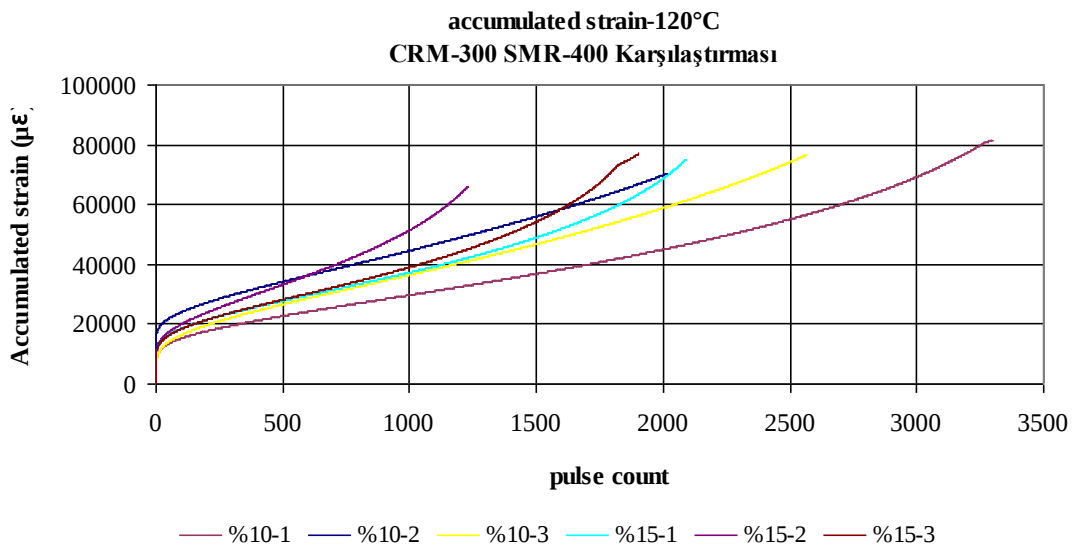
Şekil 4.78 160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği



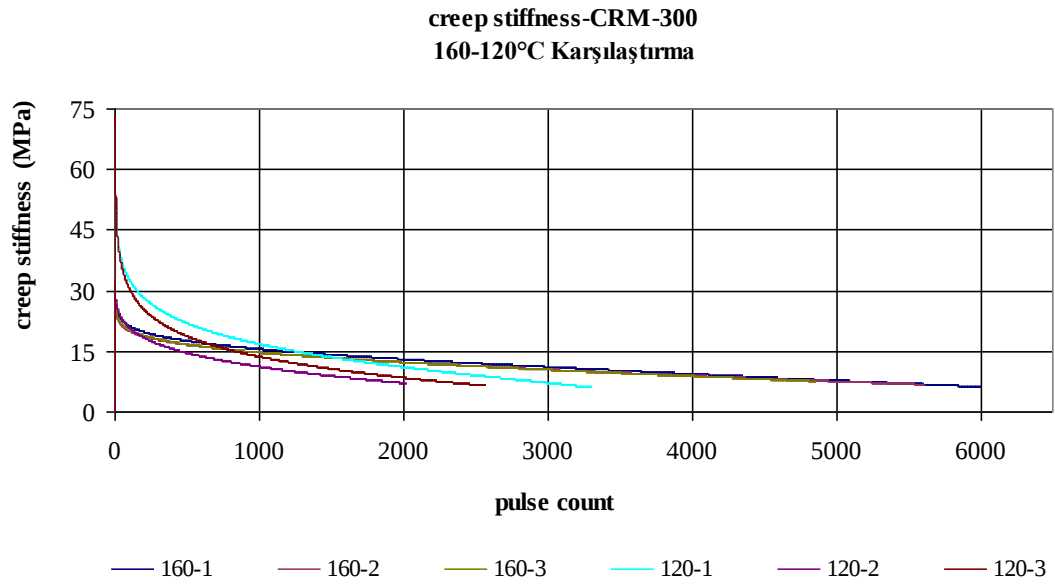
Şekil 4.79 160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği



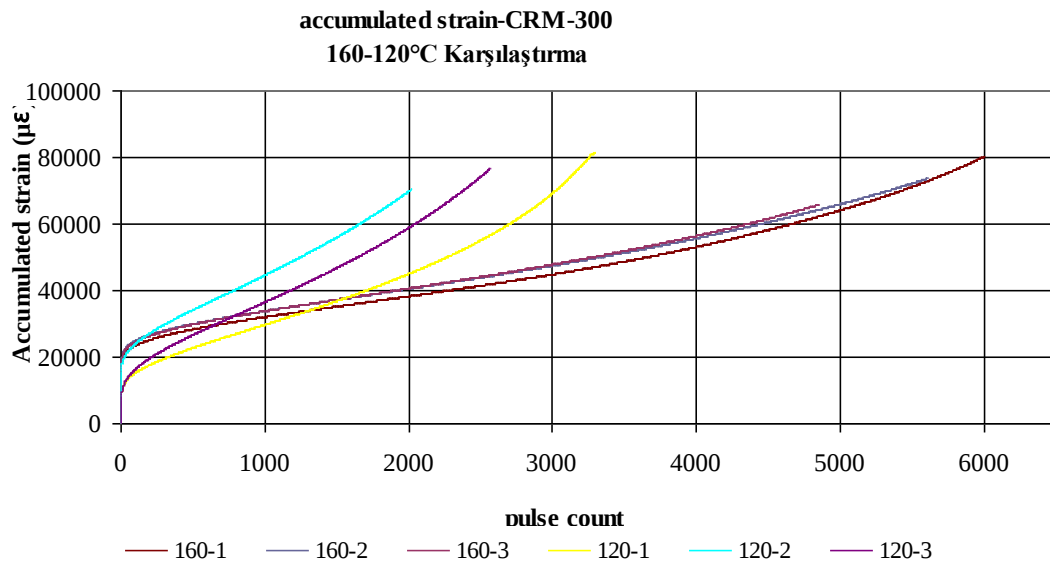
Şekil 4.80 120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği



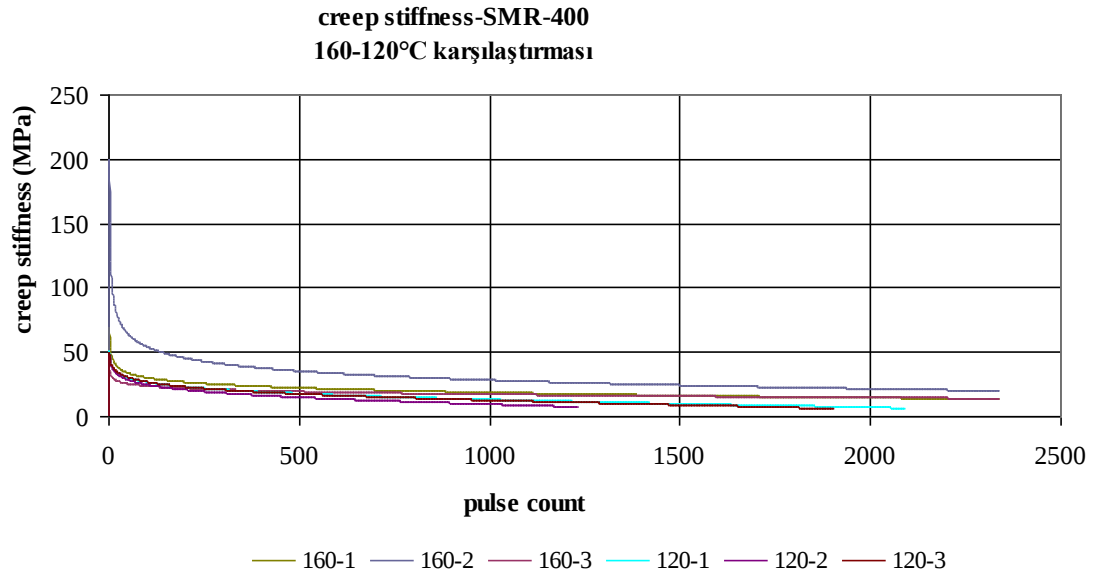
Şekil 4.81 120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği



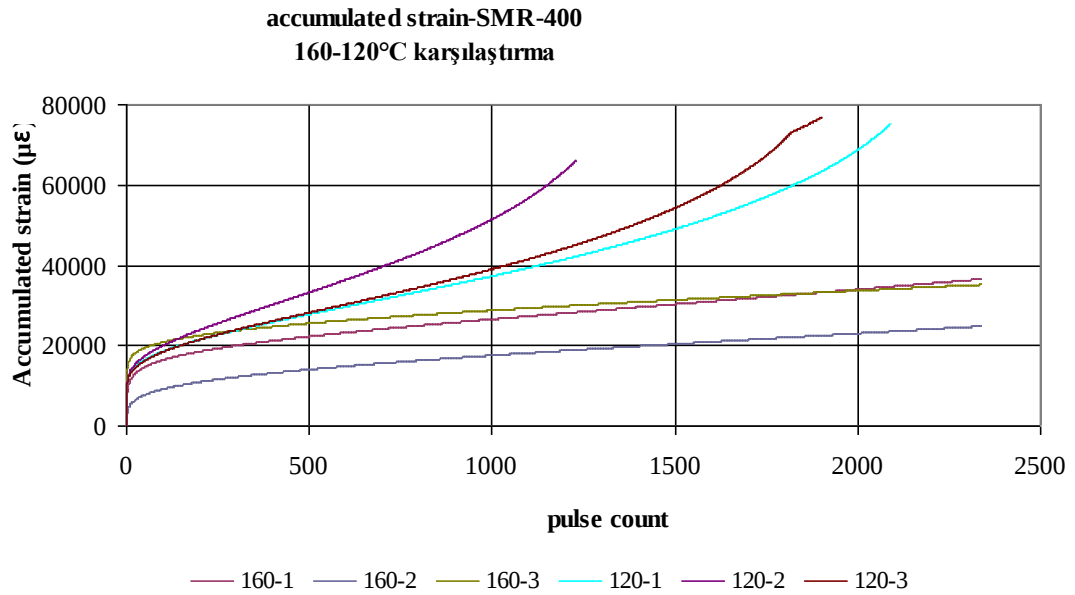
Şekil 4.82 CRM-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği



Şekil 4.83 CMR-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği



Şekil 4.84 SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği



Şekil 4.85 SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
birikimli deformasyon-vuruş sayısı grafiği

Dinamik sünme deney sonuçlarından faydalanarak aşağıdaki bulgulara erişilmiştir.

Karışım sıcaklığı etkisi;

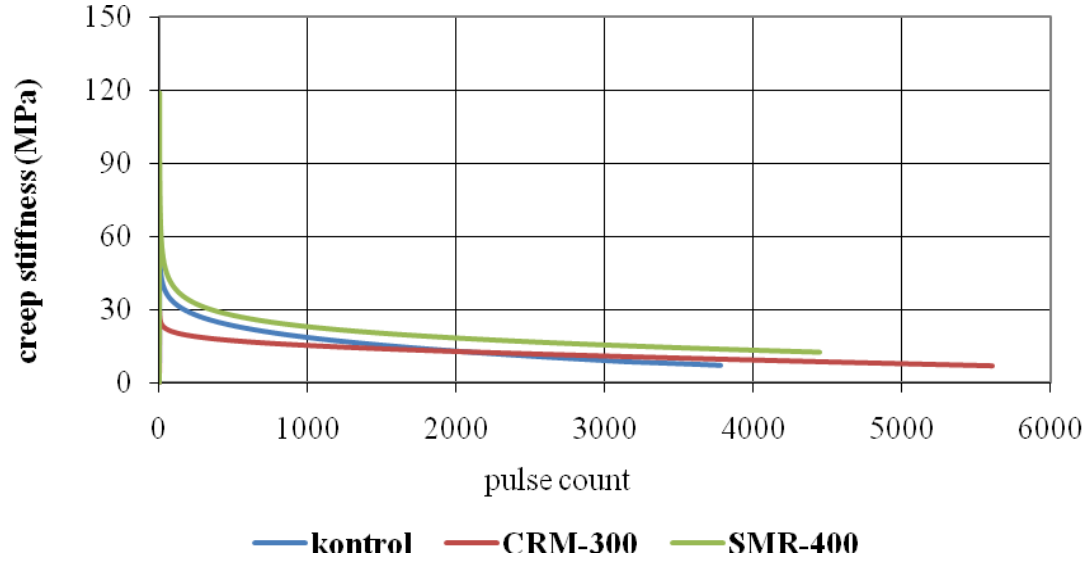
160°C’de SMR-400 modifiye bitüm katkılı numuneler daha rijit davranış göstermiştir. Rijit olduklarından dolayı yorulma süreleri kısa olmuştur (Bkz. Şekil 4.78). Birikimli deformasyonlar CRM-300 ve SMR-400 için yaklaşık olarak birbirine yakın gözlenmiştir. Ancak SMR-400 numuneleri daha düşük vuruş sayılarında kırılmıştır (Bkz. Şekil 4.79).

120°C’de CRM-300 numuneleri daha rijit davranış göstermiştir (Bkz. 4.80). CRM-300 numuneleri; SMR-400 numuneleriyle aynı derecede birikimli deformasyon göstermelerine rağmen yaklaşık yorulma ömürleri iki katına çıkmıştır (Bkz. 4.81).

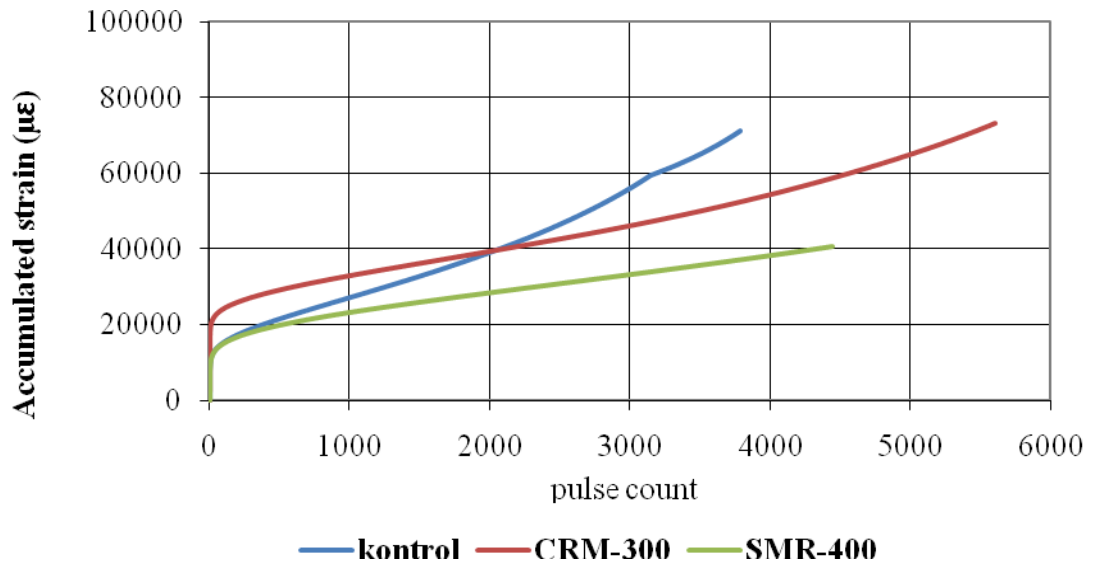
Katkı türünün etkisi;

CRM-300 numuneleri için 160°C’de dökülen numunelerin sünme rijitlikleri daha düşük çıkmıştır. Esnek davranışlarından dolayı daha uzun yorulma sürelerine sahiptir (Bkz.4.82.). 160 °C’de dökülen CRM-300 numuneleri; 120 °C’de dökülenler ile aynı deformasyon değerini daha yüksek vuruş sayılarında göstermişlerdir (Bkz. 4.83).

SMR-400 numuneleri 160°C’de daha rijit davranış göstermişlerdir (Bkz. 4.84). Birikimli deformasyonlar 160°C’de dökülen SMR-400 numunelerinde daha düşük çıkmıştır (Bkz. 4.85).

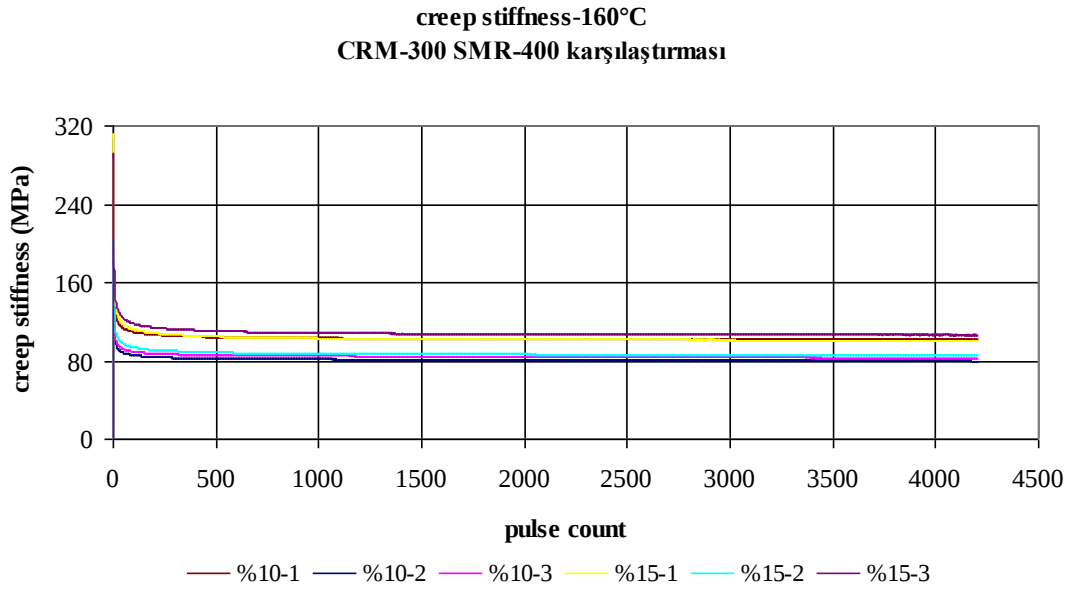


Şekil 5.86 Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan dinamik sünme deneyi sonucu sünme rijitliği-vuruş sayısı karşılaştırma grafiği

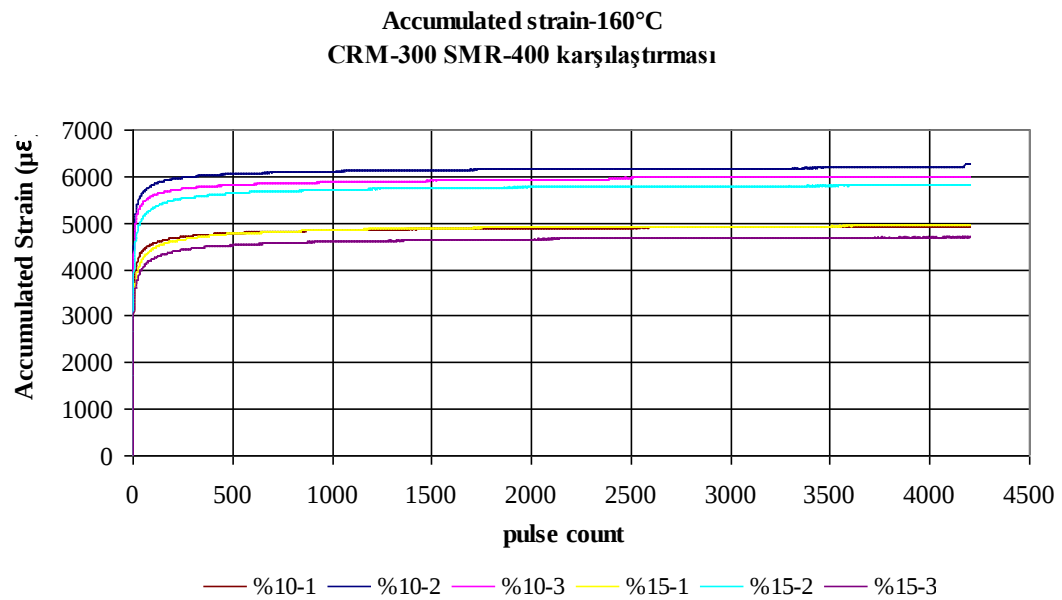


Şekil 5.87 Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan dinamik sünme deneyi sonucu birikimli deformasyon-vuruş sayısı karşılaştırma grafiği

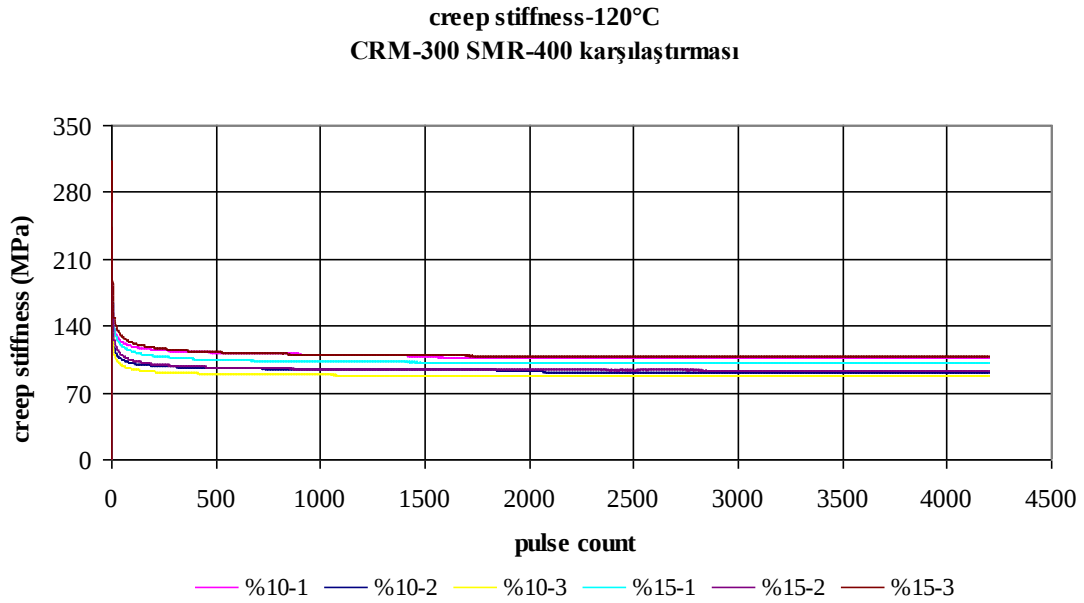
4.4.4.4. Statik sünme deney sonuçları



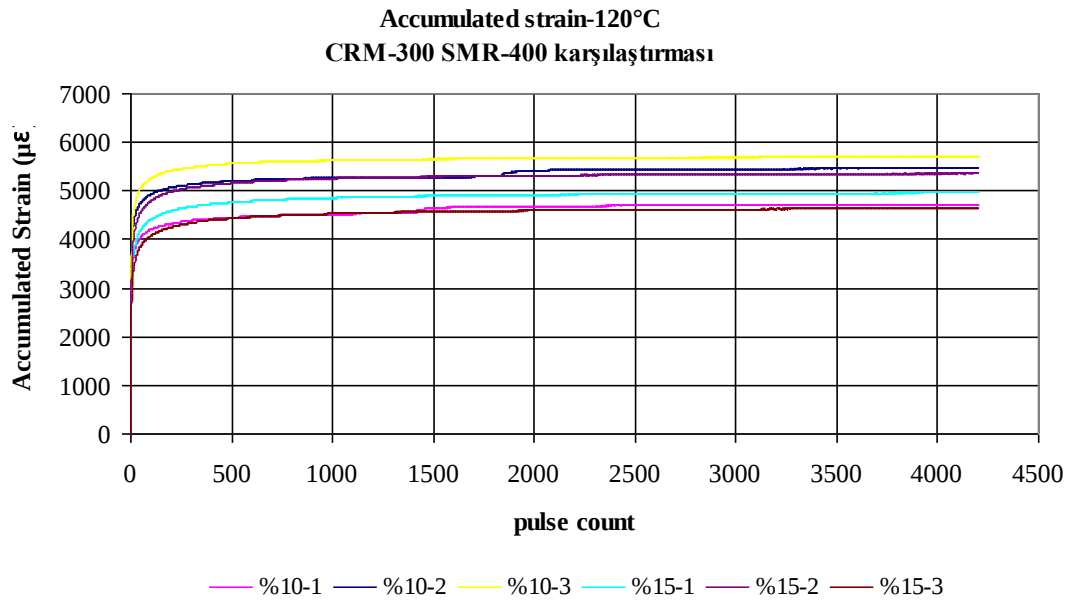
Şekil 4.88 160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin sünme rijitliği-zaman grafiği



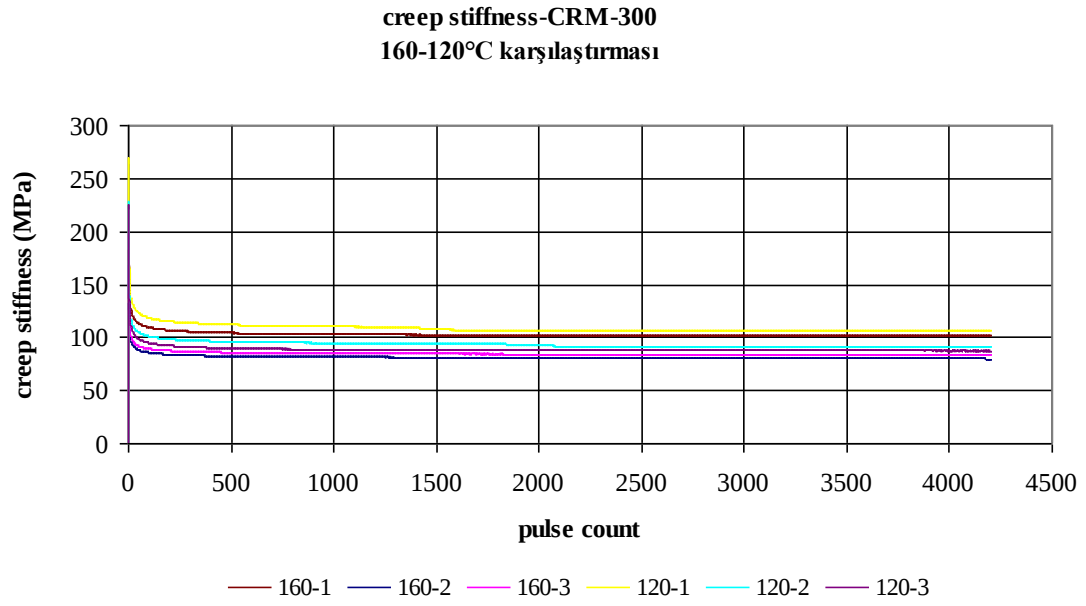
Şekil 4.89 160°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin birikimli deformasyon-zaman grafiği



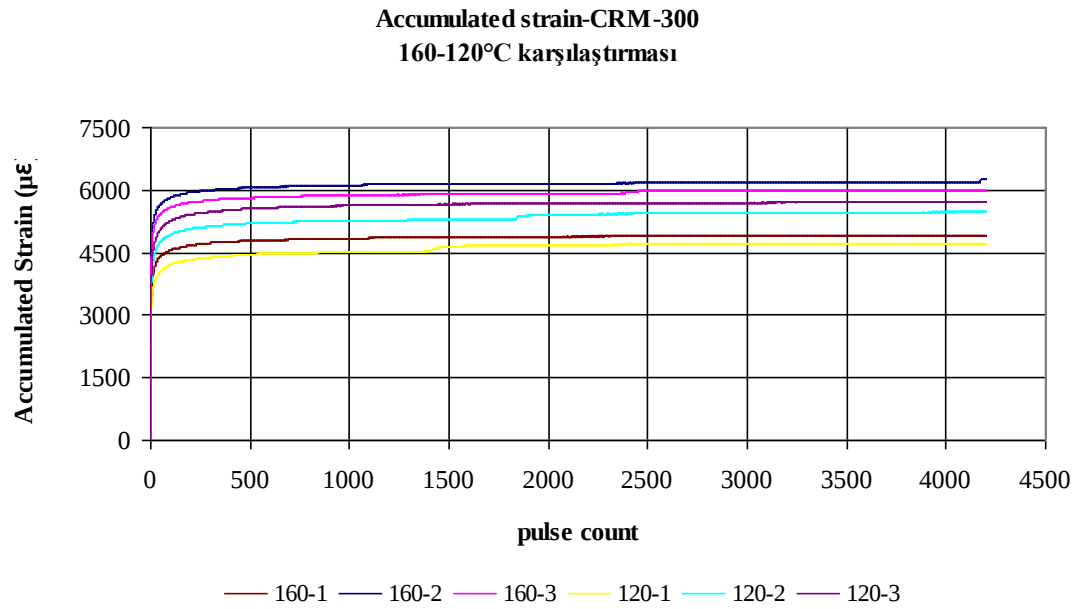
Şekil 4.90 120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin
sünme rijitliği-zaman grafiği



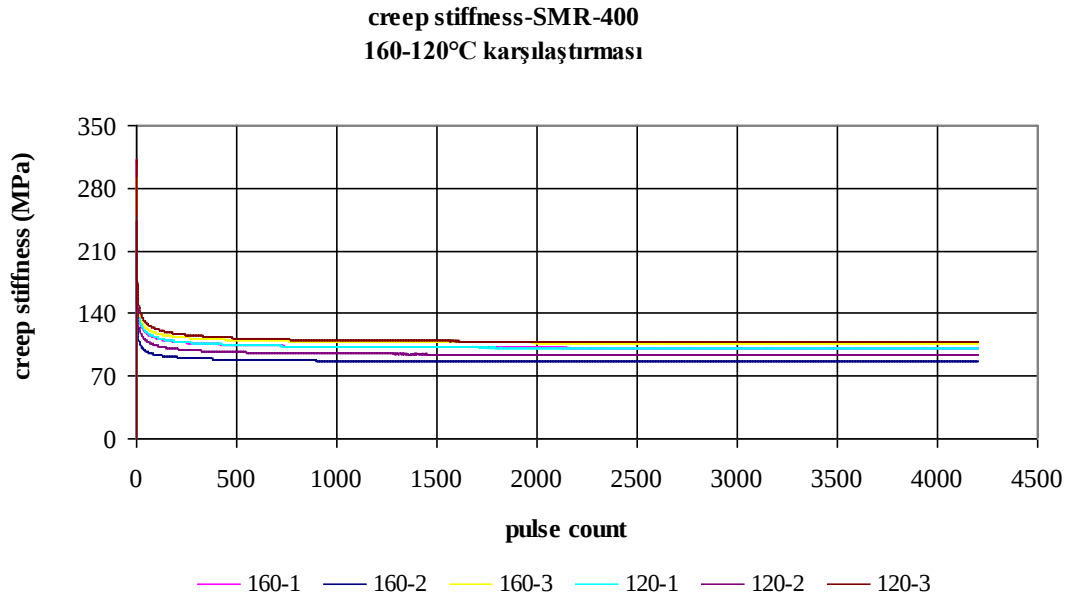
Şekil 4.91 120°C deney sıcaklığında CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin
birikimli deformasyon-zaman grafiği



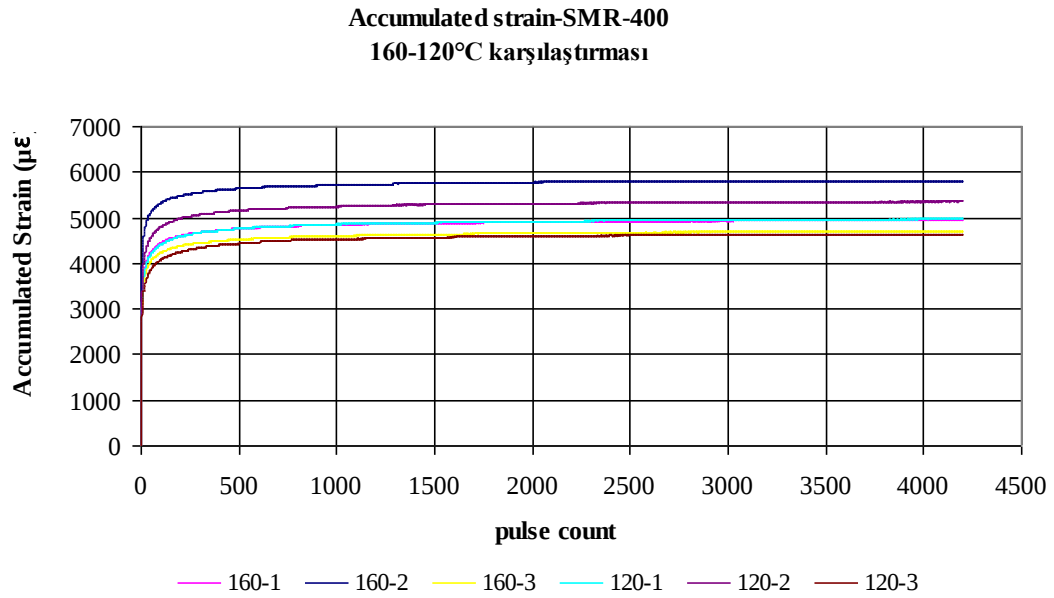
Şekil 4.92 CRM-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
sünme rijitliği-zaman grafiği



Şekil 4.93 CMR-300 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
birikimli deformasyon-zaman grafiği



Şekil 4.94 SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
sünme rijitliği-zaman grafiği



Şekil 4.95 SMR-400 katkılı numunelerin 160 ve 120°C’de
birikimli deformasyon-zaman grafiği

Statik sünme deneylerinde 10 dak. ön yükleme, ardından 60 dak. normal yükleme uygulanmıştır. Ön yükleme miktarı 10 kPa., normal yükleme 500 kPa olarak uygulanmıştır. Statik sünme deney sonuçlarından faydalanarak aşağıdaki bulgulara erişilmiştir.

Karışım sıcaklığı etkisi;

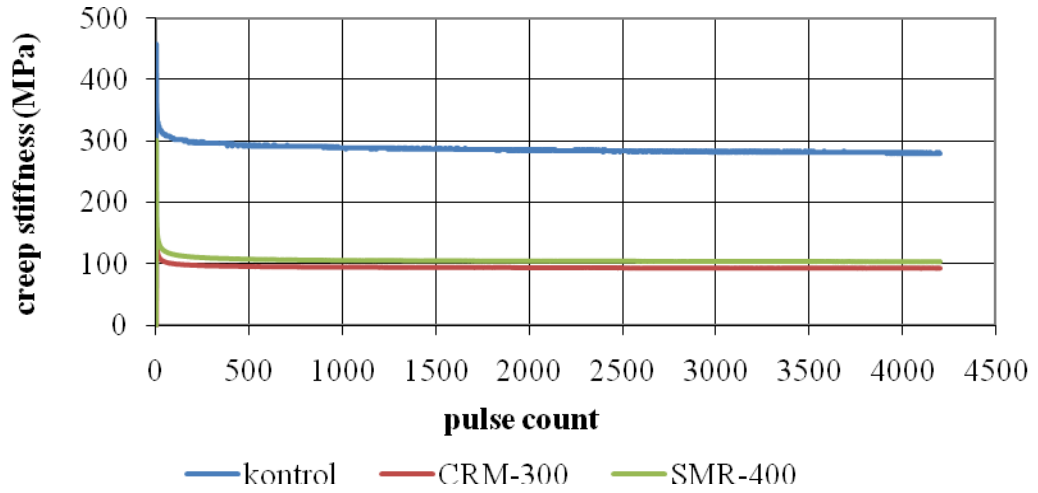
160°C’de SMR-400 modifiye bitüm katkılı numuneler daha rijit davranış göstermiştir. (Bkz. Şekil 4.86). Birikimli deformasyonlar SMR-400 numunelerinde daha yüksek çıkmıştır (Bkz. Şekil 4.87).

120°C’de de SMR-400 numuneleri daha rijit davranış göstermiştir (Bkz. 4.88). Birikimli deformasyonlar CRM-300 numunelerinde daha yüksek çıkmıştır (Bkz. Şekil 4.89).

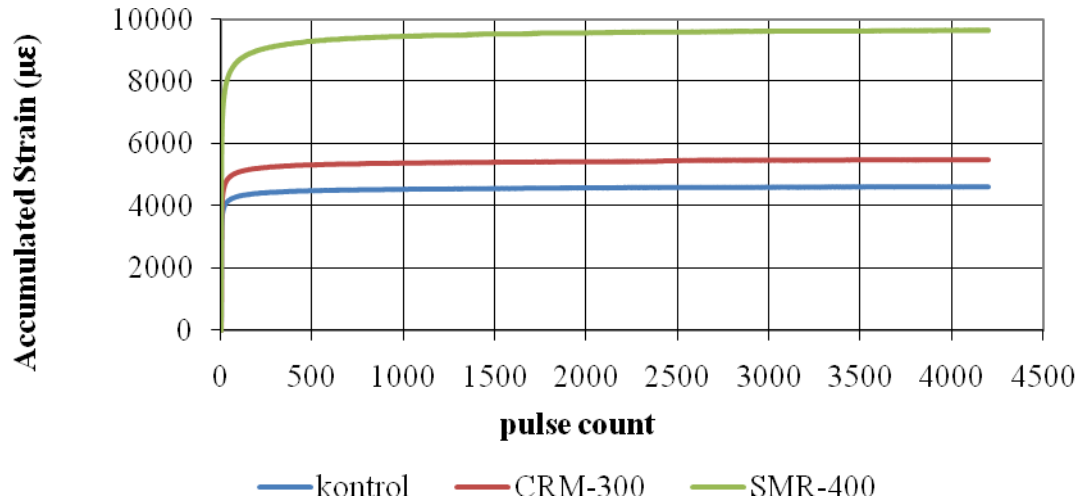
Katkı türünün etkisi;

CRM-300 numunelerinin sünme rijitlikleri 120°C’de daha yüksek çıkmıştır. (Bkz.4.90.). 160 °C’de dökülen CRM-300 numuneleri; daha yüksek deformasyon göstermişlerdir (Bkz. 4.91).

SMR-400 numuneleri 120°C’de daha rijit davranış göstermişlerdir (Bkz. 4.92). Birikimli deformasyonlar SMR-400 numunelerinde 160°C’de daha yüksek çıkmıştır (Bkz. 4.93).



Şekil 4.96 Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan statik sünme deneyi sonucu sünme rijitliği-zaman karşılaştırma grafiği



Şekil 4.97 Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere uygulanan statik sünme deneyi sonucu birikimli deformasyon-zaman karşılaştırma grafiği

4.5. KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) ve Arazi Deney Sonuçları

CRM-300 ve SMR-400 katkı maddelerinin asfalt betonu performansına olan etkilerini incelemek üzere yapılan bu deneysel çalışmalar, KGM Laboratuvar çalışmaları ile desteklenmiştir. KGM' nün bakım ve onarımından sorumlu olduğu Tokat-Turhal Devlet Yolu' nda %10 özel öğütülmüş atık lastik katkısı içeren CRM-300 bitümü kullanılarak asfalt betonu dökülmüştür. KGM laboratuvarlarında CRM-300 modifiye bitüm numunelerine Çizelge 4.45'te verilen Laboratuvar bitüm deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra araziden alınan karot numunelerine karışım performans testleri, tekerlek izinde oturma (TİO), indirek çekme mukavemeti (İÇM) ve dinamik sünme testleri uygulanmış, sonuçları Çizelge 4.46 ve Çizelge 4.47'de sırasıyla verilmiştir. Deneyler katkısız ve katkılı numuneler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.45 Modifiye bitüm deney raporu

Numunenin alındığı yer: Tokat-Turhal yolu

Katkı: CRM-300

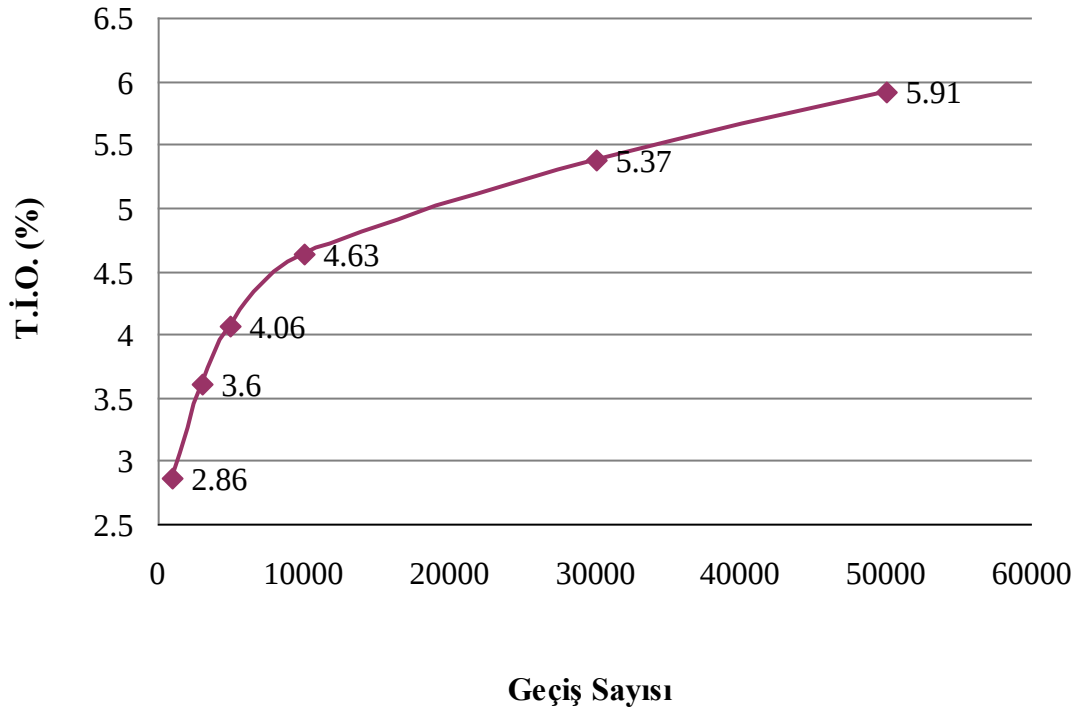
Sıra No	Deney Adı	Standardı	Birim	Sonuçlar
1	Penetrasyon	TS EN 1426	0,1 mm	50
2	Yumuşama noktası	TS EN 1427	°C	54,8
3	Kuvvet ölçümlü düktilite	TS EN 13589	J	—
4	Elastik geri dönme	TS EN 13398	%	55
5	Parlama noktası	TS EN ISO 2592	°C	260
6	Özgül Ağırlık	TS EN 15326	gr/cm ³	1,035

Çizelge 4.46 Tokat-Turhal Devlet Yolu
Lastiksiz Aşınma Karışımının TİO Ve İÇM Deney Sonuçları

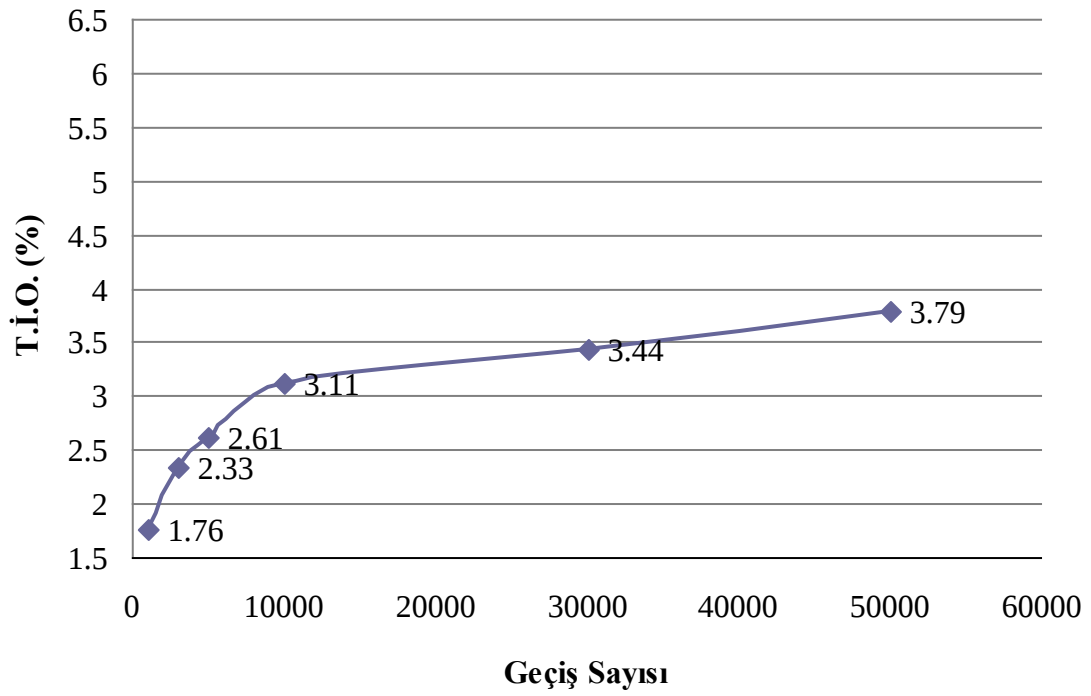
Dizayn Değerleri	Elek Açıklığı		¾	½	3/8	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% Geçen		100	86	80	51	29	12	7	5
	Opt.Bitüm		%5							
	Hacim Özgül Ağırlık		2,404							
	Boşluk %		4,21							
Ekstra	Elek Açıklığı		¾	½	3/8	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% Geçen		100	94,9	85,3	49,8	29,3	11,3	7,9	6,4
	Bitüm		4,76							
TİO	% Sıkışma		%97,1						Şartname Limiti Max. 6	
	Dp		2,334							
	Geçiş Sayısı	1000	2,86							
		3000	3,60							
		5000	4,06							
		10000	4,63							
		30000	5,37							
		50000	5,91							

Çizelge 4.47 Tokat-Turhal Devlet Yolu
CRM-300 Katkılı Aşınma Karışımının TİO Ve İÇM Deney Sonuçları

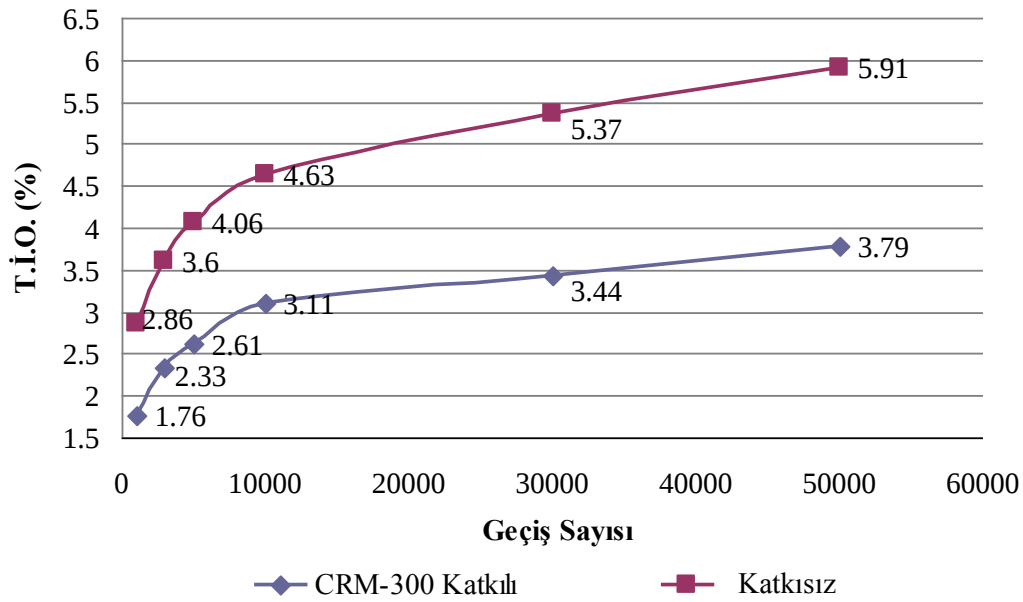
Dizayn Değerleri	Elek Açıklığı		¾	½	3/8	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% Geçen		100	86	80	51	29	12	7	5
	Opt.Bitüm		%5							
	Hacim Özgül Ağırlık		2,404							
	Boşluk %		4,21							
Ekstra	Elek Açıklığı		¾	½	3/8	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% Geçen		100	90,2	77,1	52,8	29,9	9,7	6	4,9
	Bitüm		4,25							
TİO	% Sıkışma		%95,6						Şartname Limiti Max. 6	
	Dp		2,298							
	Geçiş Sayısı	1000	1,76							
		3000	2,33							
		5000	2,61							
		10000	3,11							
		30000	3,44							
		50000	3,79							



Şekil 4.98 Katkısız karışım arazi sonuçlarına göre T.İ.O.



Şekil 4.99 CRM-300 katkılı karışım arazi sonuçlarına göre T.İ.O.



Şekil 4.100 CRM-300 katkılı ve katkısız karışımlarda tekerlek izinde oturma

Çizelge 4.48 Katkısız numuneler için İÇM

Koşulsuz İÇM (kg/cm ²)	Koşullu İÇM (kg/cm ²)	İÇM Oranı	Şartname Limiti (%)
6,23	6,96	%89,5	min. %80

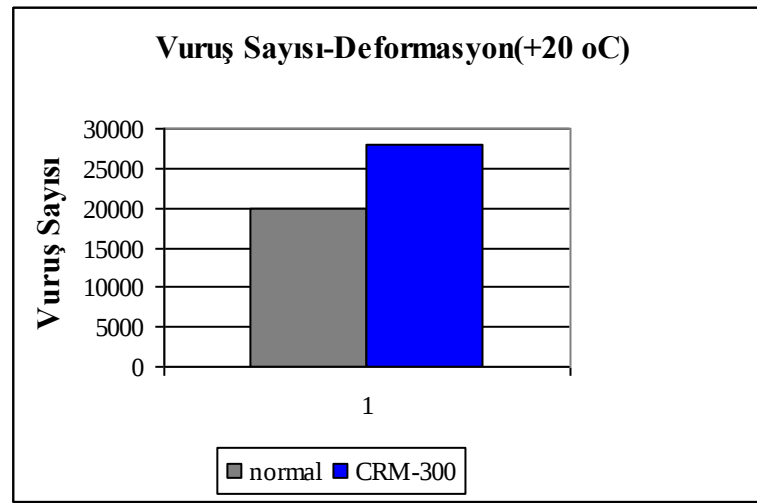
Çizelge 5.49 CRM-300 katkılı numuneler için İÇM

Koşulsuz İÇM (kg/cm ²)	Koşullu İÇM (kg/cm ²)	İÇM Oranı	Şartname Limiti (%)
8,44	7,87	%93,2	min. %80

Çizelge 4.50 Araziden alınan karot numuneleri sonuçları

	Karot No	Km	Kalınlık (mm)	Bitüm %	Dizayn Bitüm %	Dp	Sıkışma %	¾	½	3/8	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
AŞINMA	1	97+690	53,8		5,3 Lastikli	2,426	100,9								
	2	97+690	55,2			2,422	100,7								
	3	97+655	59,3			2,354	97,9								
	4	97+655	58,2			2,336	97,2								
	5	97+630	61,6	4,40		2,368	98,5	100	91,1	68,7	47,2	30,3	12,0	7,9	6,9
	6	97+630	62,1			2,378	98,9								
	7	97+703	64,3	4,48		2,366	98,4	97	85,8	77,1	51,0	27,8	10,7	7,6	6,5
	Karışım			4,53				100	87,6	73,2	47,2	25,0	9,3	6,3	5,3
	8	97+600	62,3		5 Lastikli	2,257	93,9								
	9	97+600	64,9	4,34		2,255	93,8	100	91,9	80,6	55,9	31,8	10,2	6,4	5,4
	10	97+505	58,4			2,302	95,8								
	11	97+505	61,2			2,345	97,5								
	12	97+420	53,1	4,05		2,375	98,8	100	84,5	75,0	53,8	33,4	12,8	8,3	6,6
	13	97+420	53,1			2,373	98,7								
	Karışım			4,25				100	90,2	77,1	52,8	29,9	9,7	6,0	4,9
	14	98+805	64,1		4,82 Lastiksiz	2,418	100,6								
	15	98+270	59,3			2,414	100,4								
	16		64,8			2,346	97,6								
	17		60,2			2,304	99,2								
Ortalama Değerler			59,8	4,44		2,360	98,2	99,5	88,5	75,3	51,3	29,7	10,8	7,1	5,9
Dizayn Değerleri			5,0	5,00		2,404		100	86,0	80,0	51,0	29,0	12,0	7,0	5,0
Tolerans Limitleri			4,70					100	83,0	76,0	47,0	26,0	10,0	6,0	4,0
Tolerans Limitleri			5,30					100	90,0	84,0	55,0	32,0	15,0	10,0	7,0

Yapılan çalışmada katkısız, CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelere yapılan sünme testleri, CRM-300 katkı maddesinin uygulandığı Tokat-Turhal Devlet Yolu'ndan alınan karot numunelerine de uygulanmıştır. +20°C sıcaklıkta yapılan deney sonucunda elde edilen deformasyon değerlerine ait grafik Şekil 4.101'de gösterilmiştir.



Şekil 4.101 Vuruş Sayısı-deformasyon grafiği (+20°C).

Araziden alınan numune sonuçlarına göre, CRM-300 modifiye bitüm ile dökülen asfalt betonları; katkısız asfalt betonlarına göre %35 daha fazla vuruş sayısında ömrünü tamamlamıştır.

BÖLÜM 5

EKONOMİK KARŞILAŞTIRMA

Çalışma konusu olan CMR-300 ve SMR-400 katkı maddeleri ıslak karışım halinde kullanılmış ve asfalt betonunun performansına olan etkileri araştırılmıştır. Bu katkı maddelerinin karışıma kazandırdığı iyileştirmeler deneysel çalışmalar sonucunda görülmektedir. Ancak, marshall dayanım testleri sonuçlarına bakıldığında, özel öğütülmüş lastik, Çizelge 4.51’de görüleceği üzere karışımın optimum bitüm oranını arttırmaktadır.

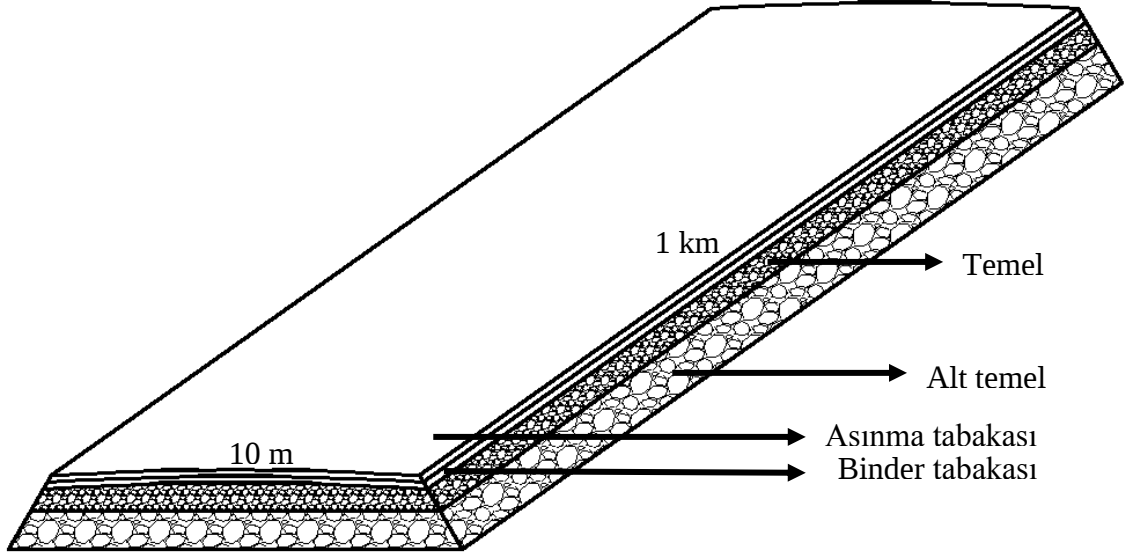
Çizelge 5.1 Marshall testi sonucu optimum bitüm oranları

Bitüm Oranı (%)		
Kontrol	CRM-300	SMR-400
4.39	4.75	5.07

Bunun için fayda-maliyet ilişkisinin yorumlanabilmesi bağlamında bir ekonomik karşılaştırma yapılmıştır.

Aşağıda, 15 cm kalınlığında binder+aşınma tabakalı, 10m genişliğinde ve 1 km uzunluğunda bir yol şematik olarak, alttemel, temel, binder ve aşınma tabakaları halinde gösterilmiştir.

Hesaplamalarda; karşılaştırılacak olan üstyapı türlerinde, temel ve alttemel tabakaları aynı şekilde tasarlanacağından dolayı, bu tabakalar hesaba dahil edilmemiştir.



Şekil 5.1 Esnek üstyapının şematik gösterimi

10km yapılması düşünülen bu yol için bitümlü tabaka hacmi;

$V = \text{tabaka yüksekliği} \times \text{yol genişliği} \times \text{yol uzunluğu}$

$$V = 0.15 \times 10 \times 1000 = 1500 \text{ m}^3$$

Bağlayıcı birim hacim ağırlığı $\delta = 2,5 \text{ t/m}^3$

Bitümlü tabakanın kütlesi;

$$M = V \times \delta$$

$$M = 1500 \times 2,5 = 3750 \text{ ton olarak bulunur.}$$

Bu 3750 ton bitümlü karışımın bitüm oranları karşılaştırılırsa;

Çizelge 5.2 Bitüm fiyatı karşılaştırma

	Katkısız	CRM-300	SMR-400
Bitüm oranı (%)	4.39	4.75	5.07
Karışımındaki miktarı (ton)	164.625	178.125	190.125
2011 bitüm birim fiyatı (TL/ton) (%1 KDV dahil)	1169		
Bitüm fiyatı (TL)	192.447	208.374	222.256

1 km yol inşaatında katkısız karışım kullanıldığında 192.447TL bitüm maliyeti hesaplanırken, aynı yolda CRM-300 katkı maddesi kullanılırsa 208.374 TL, SMR-400 katkı maddesi kullanılırsa 222.256 TL bitüm maliyeti bulunmaktadır (Çizelge 4.52).

Hesaplama da görüldüğü üzere özel öğütülmüş lastik atığın oranı ile birlikte karışımın bitüm oranı, dolayısıyla da bitüm maliyeti artmaktadır. Bu artış, yüksek maliyetli yol yapıları için fazla önem arz etmemektedir. Bunun yanında, atık lastiğin insan ve çevre sağlığına verdiği zararlar, atığın sürekliliğinden kaynaklanan depolama ve doğaya kazandırma zorlukları birlikte düşünüldüğünde CRM-300 ideal bir katkı malzemesi olarak görülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Tezin araştırma konusu olan CRM-300 ve SMR-400, kullanılmış araç lastiklerinin yüksek basınç altında sürtünme etkisiyle öğütülmesi esasına dayanmaktadır. Söz konusu katkıları karışımında hem ıslak hem de kuru olarak kullanılabilir. Bu çalışmada katkı maddeleri bitüme ilave edilerek, ıslak olarak katılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan bu katkıların hem bitüm performansına hem de karışımın performansına olan etkileri araştırılmıştır.

KTS’de verilen Aşınma Tabakası Tip-II gradasyonuna uygun olarak hazırlanan 1100 gr agrega içerisine, %3.5 ve %6.5 aralığında değişen (%0.5 artarak) 7 farklı oranda 50-70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanarak Marshall kontrol numuneleri hazırlanmıştır. Her bitüm oranı için 3’er numune olmak üzere hazırlanan katkısız 21 adet kontrol numunesine (3 set halinde $3 \times 21 = 63$ numune) yapılan alışılmış Marshall dayanımı ve akma deneyleri sonucunda optimum bitüm oranı bulunmuştur. Kontrol numunelerine ayrıca, ısı kaybı, statik ve dinamik sünme testleri uygulanmıştır.

Genel itibariyle özel öğütülmüş atık lastik, bitüme %10 (CRM-300) ve %15 (SMR-400) oranlarında katılmıştır. Kontrol numunelerine uygulanan testler, CRM-300 ve SMR-400 katkı maddesi ile hazırlanan numunelere de uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Katkısız numunelere göre CRM-300 ve SMR-400 katkılı numunelerin yumuşama ve parlama noktaları, elastik geri dönme değerleri artmış, penetrasyon, ısıtma kaybı ve özgül ağırlık değerleri azalmıştır. Yumuşama noktasının yüksek olması, özellikle sıcak iklimli bölgelerde kusmanın gecikmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

CRM-300 ve SMR-400 modifiye bitümlerinin, asfalt betonuna kazandırdıkları en önemli özellik elastikliktir. Akma değerlerinde CRM-300 ve SMR-400 de kontrol numunelerine göre sırasıyla %19.8 ve %11 düşme meydana gelmiştir. Akma miktarı düşmesi, deformasyonların azalması anlamına gelmektedir. Bu durum elastik geri dönüş ile açıklanabilir. Elastik geri dönme; bitüm üzerine uygulanan çekme kuvvetinin

kaldırılmasının ardından bitümün eski haline dönebilme özelliğidir. Bu özellik yorulma ve tekerlek izi dayanımı açısından çok önemlidir. Elastik geri dönme; bitüm içerisindeki polimerlerin kalitesinin bir ölçüsüdür (Jensen and Abdelrahman, 2006; Yildirim, 2007). Çizelge 4.30’ da verildiği üzere modifiye bitümlerin elastik geri dönüş değerleri CRM-300 ve SMR-400 için sırasıyla 30.52 ve 36.36 bulunmuştur. Bu değerler kontrol numunelerinin yaklaşık 10 katıdır. Şekil 6.1’ de elastik geri dönüş deneyi gösterilmiştir.



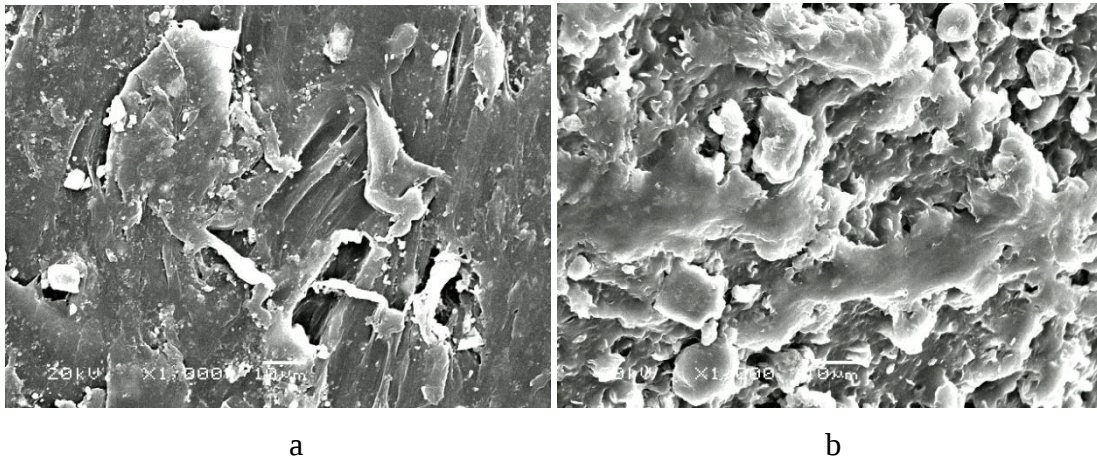
Şekil 6.1 Elastik geri dönme

CRM-300 ve SMR-400 modifiye bitümleri içerisindeki atık lastikler kendi elastikliklerini, bitüme, daha sonra da karışıma aktarmaktadırlar (Ould-Henia ve Dumont, 2006). Dolayısıyla tekrarlı yüklerin etkilerini sönmölendirebilmektedirler.

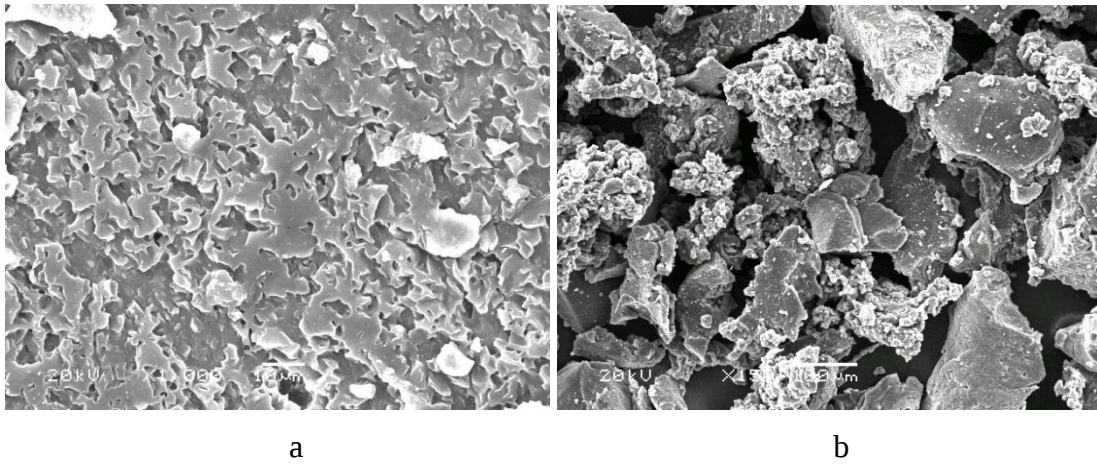
Çizelge 4.44’ te verildiği üzere OBO (Optimum Bitüm Oranı) nı belirlemek için gerçekleştirilen Marshall deney sonuçları incelendiğinde; Marshall dayanımları kontrol numunesi, CRM-300 ve SMR-400 için 1700, 1650 ve 1515 kg şeklinde elde edilmiştir. Atık lastikli modifiye bitümlü numunelerde dayanımlar çok az miktarda düşmüştür. Ancak bu dayanım değerleri şartname limitlerini (KTŞ, 2006) sağlamaktadır.

Normal öğütölmüş lastik atıkları özellikle kuru karışım olarak tasarlandığında yüksek ısı değerlerinde birbirine yapışarak kümelenme meydana gelmektedir. Ancak CMR-300 malzemesi, içine katılan, patent başvurusu yapılmış katkıları sayesinde gerek

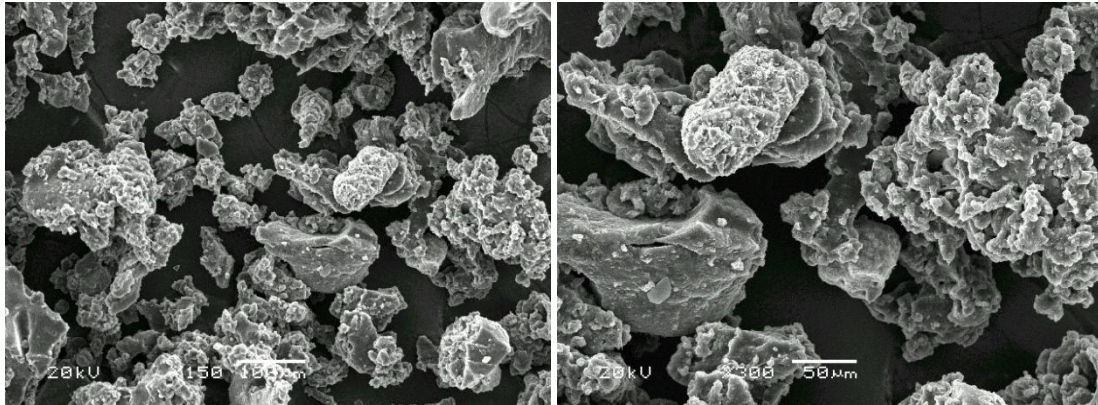
asfalt gerekse agregâ karışımı içerisinde homojen olarak dağılabilmektedir. CMR-300 katkı malzemesi, yüksek basınç altında üretildiğinden dolayı mısır patlağı şeklinde bir yapı kazanmaktadır. Şekil 6.4’ de SEM (Scan Electron Microscope) görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.2 Elektron mikroskobunda (a) sert plastik (x1000) (b) granül lastik (x1000)



Şekil 6.3 Elektron mikroskobunda (a) çubuk lastik (x1000), (b) toz lastik (x1000)



Şekil 6.4 Elektron mikroskobunda CRM(x1000)

CRM-300 ve SMR-400'ün, asfalt içerisinde kullanılan sert plastikten (Şekil 6.2.a), granül lastikten (Şekil 6.2.b), çubuk lastikten (Şekil 6.3.a) ve toz lastikten (Şekil 6.3.b) yapısal olarak farkı Şekil 6.4'te açıkça görülmektedir.

CRM-300 ve SMR-400, içerisinde sırasıyla %10 ve %15 vulkanize edilmiş, 50μ boyutlarında atık lastik içeren modifiye edilmiş patentli bitümlerdir. Atık lastikler yüksek basınç altında, birbiri ile ters yönde dönen yüzeyleri pürüzlü çarklar arasında toz hale getirilmektedir. Bu malzemelerin bitüme karıştırma sıcaklığı 150-177 °C dir. Karıştırma süresi 20 dakikadır. Burada öğütülmüş lastiklerin bitüm içerisinde difüzyonu söz konusudur (Artamendi ve diğ., 2002; Artamendi and Khalid, 2006). Vizkoziteyi ve Penetrasyon İndeksini azaltmak, homojen karışım sağlamak amacıyla Modifiye bitümlerin içerisine, EVA (Ethylene vinyl acetate) kırıntıları, çinkooksit ve polifosforikasit ilave edilmektedir. Çünkü bitüm içerisine atık lastik ilavesi ile karışımın vizkositesi artmaktadır (Kim ve diğ., 2010; Peralta, 2009). Normal atık lastik parçacıkları düz kesme şeklinde öğütüldükleri için yüzeyleri pürüzsüzdür. Oysa özel öğütülme şekillerinden dolayı CRM-300 ve SMR-400 sahip oldukları mısır patlağı şeklindeki mikroyapıları ile karışım içerisinde homojen olarak dağılmakta ve agrega yüzeylerine daha iyi tutunmaktadır.

Normal şartlar altında öğütülmüş lastik katkıları asfalt betonu içerisinde yüksek ısılarda şişme yaparak sıkışmayı önlemektedir. Bu da belli miktarda dayanımda düşmelere sebep olmaktadır. CMR-300 katkı malzemesi sahip olduğu 100μm ve daha aşağısındaki boyutu itibariyle hacim artışını önleyebilmektedir.

Çalışmada asfalt betonuna özel öğütülmüş lastik atıklarının katılmasının performansa etkisi dayanım bağlamında incelenirken hem katkı maddesinin türü hem de sıcaklık etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Normal asfalt betonu, CMR-300 ve SMR-400 Marshall dayanımı olarak yaklaşık aynı özelliklere sahiptir. Ancak tekrarlı yükler altındaki davranış itibarıyla CMR-300 ve SMR-400 oldukça fayda sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda SMR-400 katkılı asfalt betonlarında daha az deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu lastik türü malzemenin sıcaklık etkisiyle genleşmesi ve asfalt betonunda esneklik özelliği kazanımıyla açıklanabilir. Düşük sıcaklıklarda ise CRM-300 katkılı asfalt betonlarının daha yüksek vuruş sayılarında aynı deformasyonu gösterdiği gözlenmiştir. Bu da özel lastik katkılı asfalt betonlarının daha düşük sıcaklıklarda daha iyi sıkışmasından kaynaklanmaktadır.

Gerek CRM-300 gerekse SMR-400 atık lastik içeren asfalt betonlarının karıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deney sonuçları 160°C'lik karıştırma sıcaklığının daha uygun olduğunu göstermiştir.

Çalışmada özel öğütülmüş lastiklerin asfalt betonunda kullanımına yönelik statik sünme deney sonuçları da elde edilmiştir. Sonuçlar dinamik sünme sonuçlarına benzemektedir. Ancak bu deneyde uygulanan yük miktarı ve şekli daha tahribatsız olduğundan dinamik sünmedeki kadar belirgin sonuçlar elde edilememektedir.

CMR-300 ve SMR-400 katkı malzemesi, sahip olduğu ısı enerjisini normal asfalt betonuna göre daha geç kaybetmektedir. Hem numune içinde hem de numune yüzeyinde yapılan ölçümlere göre, aynı ısıya düşmeleri bakımından özel öğütülmüş lastik katkılı numuneler ile kontrol numuneleri arasında yaklaşık 20 dakika fark bulunmaktadır. Özel öğütülmüş lastik katkılı numuneler 160°C'den 40°C'ye kontrol numunelerinden 20 dakika daha geç ulaşmaktadır. Bu özelliği sayesinde gün boyunca güneş ışınlarının sağladığı ısı enerjisini bünyesinde absorbe edip, özellikle soğuk iklimli karayollarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu aynı zamanda asfalt betonunun daha uzak mesafelere taşınabilmesi anlamına gelmektedir.

CRM-300 veya SRM-400 ile modifiye edilmiş asfalt katkısı ile oluşan asfalt betonu, içerisine su çekmediği için donmalardan etkilenmemektedir. Yüzeyde oluşan su soğuk havanın etkisiyle buz tabakası oluşturmaktadır. CRM-300 ve SRM-400

katkılı asfaltın içerisinde modifikatör olarak kullanılan lastik katkı nedeni ile üzerinde hareket eden taşıt ağırlığından dolayı, kaplama tabakasındaki esneme neticesinde, kaplama tabakası üzerinde oluşan buz tabakası çatlamakta, kırılmakta ve daha sonra yüzeyden dışlanmasına neden olmaktadır. Yüzey buzlanması olmadığı için buz giderici kimyasallara ve tuzlara gerek kalmamakta, asfalt kaplamaların hizmet ömürleri uzamaktadır. Atık lastik içeren asfalt betonlarının ısılarını geç kaybetmesi, bu karışımların soğuk havalarda dökümlerini ve daha uzak mesafelere taşınmalarını mümkün kılmaktadır. Ayrıca soğuk iklimli bölgelerde güneş ışınlarını absorbe ettiklerinden dolayı, asfalt kaplama üzerindeki buzlanmaları geciktirmektedirler (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 CRM arazi uygulaması

CMR-300 ve SMR-400 katkı maddesi tamamıyla ülkemiz kaynakları kullanılarak elde edilmektedir. Bu durum ülke kaynaklarının etkin kullanılması açısından önemlidir. Ayrıca diğer ülkelerde şartnamelere girmiş olan, öğütülmüş lastiklerin yol üstyapı imalatında kullanılması, çevresel ve görsel kirliliği önleme bağlamında önemli bir paya sahiptir.

CMR-300 katkı malzemesi ile üretilen asfalt betonun uygulaması Tokat-Turhal devlet yolunda yapılmıştır. Uygulaması yapılmış olan asfalt betonundan alınan karot numunelerine yapılan tekerlek izinde oturma test sonuçlarına göre, 50000 geçiş sayısı sonucunda kontrol numunelerinde %5.91 oturma gözlenirken, CRM-300 katkılı numunelerde %3.79 oturma gözlenmiştir. Bu da özel öğütülmüş toz lastiğin, asfalt betonunun tekerlek izi dayanımını arttırdığını kanıtlamaktadır.

% 10 atık lastik içeren CRM-300 ün, sağladığı avantajlar SMR-400 e göre daha fazla gözlemlenmiştir. Çünkü atık lastiklerin bitüm içerisindeki oranı fazlalaştıkça, karışım içerisindeki hava boşlukları artmakta ve dayanım düşmektedir. Dong ve diğ. 2001 yılında yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin bitüm içerisinde optimum %6.1 kullanılarak, performans özelliklerindeki iyileşmeleri gözlemleyerek, mali yönden çok iyi bir tasarruf sağlanabileceğini vurgulamışlardır (Dong ve diğ., 2011). Kullanılacak ilave katkılar ile bu oran biraz artırılabilir.

Kontrol, CRM-300 ve SMR-400 katkılı karışımlara uygulanan marshall testi sonuçlarına göre; katkı oranının artmasıyla OBO artmıştır. Kontrol numunelerinde OBO %4.39 iken CRM-300 katkılı numunelerde %4.75, SMR-400 katkılı numunelerde %5.07 olarak elde edilmiştir.

1 km yol inşaatında katkısız karışım kullanıldığında 192.447TL bitüm maliyeti hesaplanırken, aynı yolda CRM-300 katkı maddesi kullanılırsa 208.374 TL, SMR-400 katkı maddesi kullanılırsa 222.256 TL bitüm maliyeti bulunmaktadır (Çizelge 4.52).

Hesaplama da görüldüğü üzere özel öğütülmüş lastik atığının oranı ile birlikte karışımın bitüm oranı, dolayısıyla da bitüm maliyeti artmaktadır. Bu artış, yüksek maliyetli yol yapıları için fazla önem arz etmemektedir. Bunun yanında, atık lastiğin insan ve çevre sağlığına verdiği zararlar, atığın sürekliliğinden kaynaklanan depolama ve doğaya kazandırma zorlukları birlikte düşünüldüğünde CRM-300 ideal bir katkı malzemesi olarak görülmektedir.

Atık lastiklerin bitüm içerisinde ıslak karışım şeklinde değerlendirilmesi ile hazırlanmış olan, CRM-300 ve SMR-400 modifiye bitümlerin asfalt betonları üzerinde olumlu katkıları olmaktadır. Çok yüksek miktarlarda kaynak ayrılarak gerçekleştirilen, superpave (SUPERIOR PERFORMING asphalt PAVEMENTS) araştırmalarında CRM-300 ve SMR-400 kullanılması hem fayda sağlayacak, hem de çevresel bir atığın olumlu yönde

kullanımı gerçekleşmiş olacaktır. Bu şekilde kaynakların daha etkin kullanımına katkıda bulunulabilir.

Son yıllarda nano boyuttaki malzemelerin asfalt betonunda kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Çalışmada kullanılan özel öğütölmüş lastiğın nano boyutta elde edilebilmesi halinde, gerçekleştirilmiş olan çalışmalar tekrar edilebilir. Bunun yanında, lastik katkısı ile uyum sağlayabilecek diğeri nano boyuttaki malzemelerin birlikte kullanımına yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aflaki, S. and Tabatabaee, N., 2009, Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran, *Construction and Building Materials* 23, 2141–2150.
- Aflaki, S. and Memarzadeh, M., 2011, Using two-way ANOVA and hypothesis test in evaluating crumb rubbermodification (CRM) agitation effects on rheological properties of bitumen, *Construction and Building Materials* 25 2094–2106.
- Ağar, E. vd., 1998, *Beton Yollar*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M., 2007, Stiren-Butadien-Stiren modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 11, 232-238.
- Airey, G., D., 2003, Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel* 82, 1709–1719.
- Akbulut, H., ve Gürer, C., 2006, Atık mermerlerin asfalt kaplamalarda agrega olarak değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 261.
- Akisetty, C., K., K., August 2008, Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of crm binders and mixtures, In *Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy Civil Engineering A Dissertation Presented to the Graduate School of Clemson University*.
- Akisetty, C., K., Lee, S., Amirkhanian, S., N., 2009 a, High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives, *Construction and Building Materials* 23, 565–573.
- Akisetty, C., K., Lee, S., Amirkhanian, S., N., 2009b, Effects of compaction temperature on volumetric properties of rubberized mixes containing Warm-Mix additives, *Journal of Materials in Civil Engineering* © ASCE, / 409-415.
- Akisetty, C., K., Lee, S., Rogers, W., Amirkhanian, S., N., 2010, Evaluation of engineering properties of rubberized laboratory mixes containing warm mix additives, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 38, No. 1.
- Akisetty, C., Xiao, F., Gandhi, T., Amirkhanian, S., 2011, Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive, *Construction and Building Materials* 25, 950–956.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Al-Hadidy, A., I., Yi-qiu, T., April 1, 2011, Effect of styrene-butadiene-styrene on the properties of asphalt and stone-matrix-asphalt mixture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 4.
- Al-Khateeb, G.,G., Al-Akhras, N.,M., 2011, Properties of portland cement-modified asphalt binder using superpave tests, *Construction and Building Materials* 25, 926–932.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S.,M., Sasani, A.,R., 2010, The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 24, 1060–1068.
- Artamendi, I., Eastmond, G.C., Khalid, H., 2002. Influence of crumb rubber modifier (CRM) from tyre waste on the rheological properties of bituminous binders, *Proceedings of 3rd Int. Conf. Bituminous Mixtures and Pavements*, Thessaloniki, 65-74.
- Artamendi, I., Khalid, H.A., 2006. Diffusion Kinetics of Bitumen into Waste Tyre Rubber, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *Proceedings of the Technical Sessions*, Vol. 75, Savannah, Georgia, 133-164.
- Baochang, Z., Man, X., Dewen, Z., Huixuan, Z., Baoyan, Z., 2009, The effect of styrene – butadiene – rubber / montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt, *Construction and Building Materials* 23, 3112–3117.
- Bilgiç, Ş. ve Karacasu, M., Karayolu Ders Notları, 2008, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.
- Blumenthal M., 2002, Changes impacting the ground rubber industry. Rubber Manufacturers Association”, Montreal, Canada. Available from: http://www.rubberassociation.ca/pdf_docs/RR2002/Michael2.pdf
- Camph DH, Siwek S, Forestieri F. 1997, How to keep America moving:Report on the US Department of Transportation_s outreach on reauthorization of the Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA). In: Elles-Boyle A, editor. Office of Governmental Affairs, Washington, DC.
- Cao, R. and Bai, Q., 2007, Laboratory evaluation of performances of asphalt rubber and gap graded mixtures, *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructures in China Congress (ISSTP)*.
- Cao, W., 2007, Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process, *Construction and Building Materials* 21, 1011–1015.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Carlson, D. and D., Zhu, H., October 7, 1999, Asphalt-rubber an anchor to crumb rubber markets, Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment International Rubber Forum Veracruz, Mexico.
- Carné P., C., December 2009, Study of compatibilization methods for high density polyethylene and ground tyre rubber: Exploring new routes to recycle scrap tyres, To obtain The doctor's degree, The Polytechnical University of Catalonia Chemical Engineering Department, Barcelona,.
- Chiu, C. and Lu, L., 2007, A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber, *Construction and Building Materials* 21, 1027–1033.
- Chiu, C., 2008, Use of ground tire rubber in asphalt pavements: Field trial and evaluation in Taiwan, *Resources, Conservation and Recycling* 52, 522–532.
- Chiu, C., Hsu, T.-H., Yang, W.-F., 2008, Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling* 52, 545–556.
- Choubane, B., Sholar, G., James, A., Musselman A., Gale, C., 1988, Long term performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes, Research Report FL/DOT/SMO/98-431.
- Cooper, S., B., December 2008, Master of Science , Characterization of hma mixtures containing high recycled asphalt pavement content withcrumb rubber additives, Louisiana State University Agricultural and Mechanical College, The Department of Civil and Environmental Engineering
- Çelik, O., N., 2001, Ögütölmüş atık otomobil lastiğıyle modifiye edilmiş bitömler ile yapılan asfalt betonunun yorulma davranışı, *Türk J Engin Environ Sci* 25, 487-495.
- Çelik, O., N., July 2005, Air permeability of asphalt concrete made with shredded-tire rubber-modified binders and its relationship with porosity, *Journal of Testing and Evaluation*, , Vol. 33, No. 4.
- Çelik, O., N. and Atış, C., D., 2008, Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber - modified binders, *Construction and Building Materials* 22, 1143–1147.
- Çubuk, M., K., 1998, Doktora Tezi, Katkı malzemesi olarak diatomitin, bitömlü sıcak karışımların davranışları üzerindeki etkileri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 185 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M., K., 2009, Improvement of bitumen performance with epoxy resin, Fuel 88 1324–1328.
- Deniz, M., T., İbrahim, S., Yıldırım, S., A., Eren, B., K., 11-13 Kasım 2010, Kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkisi, 15. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası,.
- Dhir, R., K., Limbachiya, M., Kevin C., A., P., 19-20 March 2001, Recycling and reuse of used tyres, proceedings of the international symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the University of Dundee, p.163-173.
- Dong, R., Li, J., Wang, S., 2011. Laboratory Evaluation of Pre-Devulcanized Crumb Rubber–Modified Asphalt as a Binder in Hot-Mix Asphalt, Journal of Materials in Civ. Eng., 23(8): 1138-1145.
- Elizabeth A. and Hunt, P.E., March 2002, Oregon Department of Transportation Research Group Salem, Oregon 97301-5192, Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete In Oregon.
- Fang, C., Li, T., Zhou, S., Wang, X., Heiliger, L., 2008, Study on the modification mechanism of asphalt with waste packaging polymer, Transportation and Development Innovative Best Practices (TDIBP2008).
- Gandhi, T., May 2008, Effects of warm asphalt additives on asphalt binder and mixture properties, Degree Doctor of Philosophy, Civil Engineering in Graduate School of Clemson University.
- Morales, M., G., Partal, P., Navarro, F., J., Gallegos, C., 2006, Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, Fuel 85, 936–943.
- Giriftinoğlu, Ç., 2007, Plastik atıkların asfalt yol kaplamalarında kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- He, Z., Lu, Z., Zhang, W. 2010, Performance study on rubber powder modified asphalt of waste tire, ICCTP: Integrated Transportation Systems Green•Intelligent Reliable ASCE.
- Huang, B., Mohammad, L., Graves, P., Abadie, C., 2002, Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement. Transport Res Rec: J Transport Res Board, 1789:1–13

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Huang, Y., Bird, R., Heidrich, O., 2007, A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, Resources, Conservation and Recycling 52, 58–73.
- İsfalt, 2001, Asfalt ve Uygulamaları, Seçil Ofset, 280 syf.
- İsfalt, erişim tarihi: Haziran 2010, www. http://isfalt.com/isfalt_dunyada_asfalt.html
- Jensen, W., Abdelrahman, M., 2006. Crumb Rubber in Performance-Graded Asphalt Binder. Nebraska Department of Roads, Final Report, SPR-01 (05) P585, University of Nebraska-Lincoln.
- Lee, S., Amirkhanian, S., N., Kim, K., W., 2010, Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders, Construction and Building Materials 24, 824–831.
- Kanabar, N., December, 2010, Comparison of ethylene terpolymer, styrene butadiene, and polyphosphoric acid type modifiersfor asphalt cement, Master of Science, Queen’s UniversityKingston, Ontario, Canada.
- Karacasu, M. ve Bilgiç, Ş., 2009, Atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 753 syf.
- Keyf, S., 2010, Investigation of penetration and penetration index in bitumen modified with sbs and reactive terpolymer, Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 28, 26-34.
- Kim, H., Lee, S., Amirkhanian, S., 2010, Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders, KSCE Journal of Civil Engineering, 14(6):839-843.
- King G et al. 1999, Additives in asphalt, J Assoc Asphalt Paving Technol A;68:32–69.
- Kök, B., V. and Kuloğlu, N., 2007, The effects of different binders on mechanical properties of hot mix asphalt, International Journal of Science & Technology Volume 2, No 1, 41-48,
- Kök, B., V.and Çolak, 2011, H., Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt, Construction and Building Materials 25, 3204–3212.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Kumar, P., Mehndiratta, H., Singh, K., September 2009, Rheological properties of crumb rubber modified bitumen- a lab study, Journal of scientific & industrial research vol.68, 812-816.
- Lee, S., August 2007, Characterization of recycled aged crm binders, Doctor of Philosophy, Graduate School of Clemson University, Civil Engineering.
- Lee, S., Amirkhanian, S., N., Putman, B., Kim, K., W., December 2007, Laboratory study of the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of crm asphalt mixtures, Journal Of Materials In Civil Engineering © Asce, 1079-1089.
- Daryl, M., Susana, H., Ryan, W., Ludo, Z., October 2007, Study of crumb rubber materials as paving asphalt modifiers, Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 34, Number 10, 1276-1288(13).
- Maupin, G.W. and Payne, C., W., September 1997, Final Report Evaluation Of Asphalt Rubber Stress-Absorbing Membrane, Virginia Transportation Research Council, VTRC 98-R11.
- McDonald, R., M., June 25, 2004, Recycled materials relational database: design and implementation aspects, Master of Science in Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering College of Engineering University of South Florida,.
- McQuillen, J., L., Takallou, H., B., Hicks, R., G., Esch, D., May, 1988, Economic Analysis Of Rubber-Modified Asphalt Mixes, Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, No. 3.
- Naji, J., A. and Asi, I., M., December 2008, Performance evaluation of asphalt concrete mixes containing granular volcanic ash, Journal Of Materials In Civil Engineering Asce 10.1061/ ASCE 0899-1561
- Navarro, F., J., Partal, P., Martí'nez-Boza, F., Gallegos, C., 2004, Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens, Fuel 83 2041–2049.
- Dantas Neto, S., A., Farias, M., M., Pais, J., C., Pereira, P., 2003, Optimization of asphalt rubber hot mixes based on performance laboratory tests, Mairepav-AR-Eng.
- Ongel, A., Kohler, E., Harvey, J., November 2008, Principal components regression of onboard sound intensity levels, Journal Of Transportation Engineering © Asce , 459-466.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Ould-Henia, M., Dumont, A.-G., 2006. Assessment of the Rheological Properties of Asphalt Rubber Binder and its Residual Phases, Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA, 931-948.
- Özen, H., 2005, Ulaştırma Laboratuvar Deneyleri, Yıldız Teknik üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 65 s.
- Öztürk, M., 2008, Yük ve yolcu taşımacılığı ve sera gazı salınımı, Ankara.
- Palit, S. ,K. ,Reddy, K., Pandey, B., B., February 2004, Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes, Journal Of Materials In Civil Engineering © Asce , 45-53.
- Peralta, E., J., F., 2009, Study of the interaction between bitumen and rubber, Universidade do Minho.
- Phetcharat, S.and Kongsuwan, S., April 2003, Use of reclaimed rubber to develop slurry seal, Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID4), ,Bangkok,Thailand.
- Punith, V., S.and Veeraragavan, A., June 2007, Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive, Journal Of Materials In Civil Engineering © ASCE.
- Putman, B., J. et al., 2005, High temperature properties of crumb rubber modified binders, Fourth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Belfast, Ireland.
- Sacramento County Department of Environmental Review and Assessment, Report on the Status of Rubberized Asphalt Traffic Noise Reduction in Sacramento County, 1999.
- Sayın, E. ve Tanyıldızı, H., 2006, Bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin bulanık mantık ile bulunması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 21, No 4, 645-649.
- Seçginli, M., 2007, Karayolu Esnek Üst Yapılarında Sönmüş Kireç Katkısının Düşük Sıcaklık Çatlama Direncine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Shell Bitüm El Kitabı, 2004, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 3.
- Shen, J., et al, 2009, Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders, Construction and Building Materials 23, 304–310.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Su, N.,and Chen, J., S., 2002, Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass, *Resources, Conservation and Recycling* 35, 259–274.
- Sugözü, İ.ve Mutlu, İ., 2009, Atık taşıt lastikleri ve değerlendirme yöntemleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 1, No: 1, (35-46).
- Tapkın S., vd., 2009, Polipropilen fiber katkısı ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların tekrarlı sünme davranışı, 8. Ulaştırma Kongresi, 30 Eylül-2 Ekim İstanbul, 183-194.
- Tapkın, S., 2008, The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, *Building and Environment* 43, 1065–1071.
- Tapkın, S., et al., 2009, Accumulated strain prediction of polypropylene modified marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks, *Expert Systems with Applications* 36, 11186–11197.
- Tapkın, S., et al., 2010, Prediction of marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks, *Expert Systems with Applications* 37, 4660–4670.
- Thodesen, C., et al, 2009, Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity, *Construction and Building Materials* 23, 295–303.
- Thodesen, C., et al, 2009, Modeling viscosity behavior of crumb rubber modified binders, *Construction and Building Materials* 23, 3053–3062.
- Tortum, A., et al, 2005, Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete, *Building and Environment*, 40-1492–1504.
- Tuncan, M., et al., 2003, The use of waste materials in asphalt concrete mixtures, *Waste Management & Research*:21, 83–92.
- Tunç, A., 2004a, *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- Tunç, A., 2004b, *Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 550 syf.
- Tunç, A., 2007, *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Nobel Yayın Dağıtım, 840 syf.
- Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği, erişim tarihi:29.11.2010, www.asmud.org.tr.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Umar, F. ve Ağar, E., 1985, Yol Üst Yapısı, İTÜ İnşaat Fakóltesi Matbaası, İstanbul.
- Xiao, F., December 2006, Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (rac) containing reclaimed asphalt pavement (rap) mixtures, Doctor of Philosophy, Graduate School of Clemson University., Civil Engineering,.
- Xiao, F., et al, 2007, Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures, Journal Of Materials In Civil Engineering © ASCE, 475-483.
- Xiao, F., et al, 2009a, Prediction of fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks, Journal Of Materials In Civil Engineering © ASCE 253.
- Xiao, F., et al, 2009b, Effects of long term aging on laboratory prepared rubberized asphalt binders, Journal of Testing & Evaluation;, Vol. 37 Issue 4, p329-336.
- Xiao, F. et al, 2009c, Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives, Construction and Building Materials 23, 3144–3151.
- Xiao, F. Et al, 2009d, Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures, Construction and Building MaterialsVolume 23, Issue 2, 1028-1034
- Xiao, F. and Amirkhanian, S., 2009, Artificial neural network approach to estimating stiffness behavior of rubberized asphalt concrete containing reclaimed asphalt Pavement, Journal Of Transportation Engineering © ASCE.
- Xiao, F.and Amirkhanian, S., 2010, Laboratory investigation of utilizing high percentage of RAP in rubberized asphalt mixture, Materials and Structures 43, 223–233.
- Yayla, N., 2009, Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, 285syf.
- Yeşilata, B. vd., 2007a, Atık taşıt lastiklerinin geri kazanımı ve yalıtım amaçlı kullanımı, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 102 , 64-72.
- Yesilata, B. vd., 2007b, Atık taşıt lastiklerinin depolanmasına yönelik çevresel sorunların irdelenmesi, Çevre Bilim ve Teknoloji Dergisi, cilt 2, sayı 4, 367-381.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Yıldırım, Y., 2007, Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials* 21, 66–72.
- Yılmaz, M.ve Ahmedzade, P., 2008, Saf ve SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmadan sonraki özelliklerinin iki farklı yaşlandırma yöntemi kullanılarak incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 23, No 3, 569-575,.
- Yılmaz, M.ve Kök, B., V., 2008, Stiren-butadien-stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyesinin ve işlenebilirliğinin belirlenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 23, No 4, 811-819,.
- Yousefi, A., A., Janvier 1999, Preparation and rheological behavior of polymer modified asphalts, *Département de génie chimique, Faculté Des Sciences Et De Génie Université Laval Québec*.
- Yousefi, A., A., 2002, Rubber-modified bitumens, *Iranian Polymer Journal*, 11 (5), , 303-309.
- Yücel, H., E., 2007, Polifiber kullanımının asfalt karışımı özellikleri üzerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi*.
- Zhang, S., L., et al, 2009, Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing wasterubber tire powder, *Waste Management* 29 1480–1485.
- Zhang, S., L., et al, 2010, Prediction of mechanical properties of polypropylene/waste ground rubber tire powder treated by bitumen composites via uniform design and artificial neural networks, *Materials and Design* 31, 1900–1905.
- Zoorob, SE. and Suparma, B., 2000, Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt), *Cement & Concrete Composites* 22,233-242.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Eskişehir’de doğdu. İlköğrenimini 1984 yılında Eskişehir Porsuk İlkokulunda, orta ve lise öğrenimini Eskişehir Cumhuriyet Lisesinde 1987 ve 1990 yılında tamamladı. 1996 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Yine bu yılda Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 1999 yılında İnşaat Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Halen Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.