



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ATIK PLASTİK PİROLİZ İLE YAPILAN TAŞ
MASTİK ASFALT VE ASFALT BETONUN
İŞLENEBİLİRLİĞİ

Nasrat Jamal BEHZAD

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nasrat Jamal BEHZAD tarafından hazırlanan “Atık Plastik Piroлиз ile Yapılan Taş Mastik Asfalt ve Asfalt Betonun İşlenebilirliği” adlı tez çalışması 22/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

.....

Üye

Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Nasrat Jamal BEHZAD
Tarih: 22.12.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK PLASTİK PİROLİZ İLE YAPILAN TAŞ MASTİK ASFALT VE ASFALT BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Nasrat Jamal BEHZAD

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Yıl, 2023 Sayfa 113

Jüri

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN**

Günümüzde nüfus artışına bağlı olarak artan tüketim ve yaşam standartlarındaki değişim gibi faktörlerden dolayı plastiklerin tüketimi oldukça artmıştır. Bununla birlikte mevcut kaynakların hızlı bir şekilde tüketimi, çevre ve görüntü kirliliği gibi evrensel sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeplerden dolayı plastik atıkların geri dönüşümü hem ekonomik hem de çevresel bakımdan büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma, atık plastiklerin pirolizi sonucu elde edilen malzemelerin bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır.

Atık naylon poşet plastiklerinden, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), polietilen tereftalat (PET) ve polipropilen (PP) (ağırlıkça %15 YYPE, %30 AYPE, %30 PET ve %25 PP oranlarında) piroliz edilmiştir. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen katı malzeme(NPP) kullanılarak %3 ve %5 oranında modifiye bitümler üretilmiş ve bu modifiye bitümlerle asfalt betonu karışımları hazırlanarak bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği üzerinde etkileri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca atık plastik polipropilen piroliz ile elde edilen katı malzeme kullanılarak %5 oranında modifiye bitüm üretilmiş, ayrıca SBS katkı maddesi ile %4,5 oranında modifiye bitüm elde edilmiştir. Bu modifiye bitümlerle taş mastik asfalt karışımları hazırlanmış ve bu malzemelerin bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği üzerinde etkileri araştırılmıştır. Saf (B50/70) ve bütün katkılı bitümlere penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Karışımların optimum bitüm içeriğini (OBİ) belirlemek ve yoğunluk, boşluk oranı, akma ve stabilite gibi özelliklerini değerlendirmek amacıyla Marshall tasarım deneyi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Gayrator sıkıştırma makinesi (GSM) kullanılarak karışımların işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Asfalt Betonu (AB) için, her üç karışım tipi (Saf, %3NPP ve %5NPP) için 3'er adet numune (OBİ, OBİ+0.5 ve OBİ-0.5) olmak üzere toplamda 9 numune hazırlanmıştır. Aynı şekilde, Taş Mastik Asfalt (TMA) için, her üç karışım tipi (Saf, %5PP ve %4,5SBS) için 3'er adet numune (OBİ, OBİ+0.5 ve OBİ-0.5) olmak üzere toplamda 9 numune, 155°C karıştırılmış ve 145°C sıkıştırılmıştır. Bütün numunelerin çapı 15cm olup, 50 devirde sıkıştırılmışlardır. Elde edilen sonuçlar, $WI = (1/A) \cdot 100$ formülü kullanılarak işlenebilirlik indeksleri, 30 ve 50 devirlerinde hesaplanmıştır. NPP içeren sıcak karışımların işlenebilirliği üzerinde pozitif etkisi olduğu gözlemlenmiş ve karışımın işlenebilirliğini artırmak için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde, PP içeren sıcak karışımların işlenebilirliği üzerinde pozitif etkisi olduğu belirlenmiş ve bu malzemenin katkı maddesi olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur. Öte yandan, SBS içeren karışımların işlenebilirliği üzerinde belirgin bir etki tespit edilmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt, Atık plastikler, Bitümlü Sıcak Karışım, İşlenebilirlik, Piroliz

ABSTRACT

M.S THESIS

WORKABILITY OF STONE MASTIC ASPHALT AND ASPHALT CONCRETE MADE BY WASTE PLASTIC PYROLYSIS

Nasrat Jamal BEHZAD

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Year, 2023, 113 Pages

Jury

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN**

Due to factors such as increasing consumption and changes in living standards associated with population growth, the consumption of plastics has significantly increased in today's world. However, the rapid depletion of existing resources leads to universal issues such as environmental pollution and visual pollution. For these reasons, the recycling of plastic waste is of great importance both economically and environmentally. This study aims to examine the effects of materials obtained from the pyrolysis of waste plastics on the workability of bituminous hot mixtures.

Waste nylon bag plastics, including high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), and polypropylene (PP) (weight percentages of 15% HDPE, 30% LDPE, 30% PET, and 25% PP), were subjected to pyrolysis. The solid material (NPP) obtained from the pyrolysis process was utilized to produce modified bitumens at 3% and 5% ratios. Asphalt concrete mixtures were then prepared with these modified bitumens, and the effects on the workability of bituminous hot mixtures were investigated. Additionally, in the study, solid material obtained from the pyrolysis of waste plastic polypropylene was used to produce 5% modified bitumen. Furthermore, 4.5% modified bitumen was obtained with SBS additive. Stone mastic asphalt mixtures were prepared with these modified bitumens, and the effects of these materials on the workability of bituminous hot mixtures were investigated. Penetration and softening point tests were conducted on both pure (B50/70) and all modified bitumens. The Marshall design experiment was conducted to determine the optimum bitumen content (OBC) of the mixtures and to assess their characteristics, including density, void ratio, flow, and stability. As part of the study, the workability of the mixtures was evaluated using the Gyrotory Shear Machine (GSM). For Asphalt Concrete (AC), a total of 9 samples were prepared, including three mixture types (Pure, 3%NPP, and 5%NPP) with three samples each (OBC, OBC+0.5, and OBC-0.5). Similarly, for Stone Mastic Asphalt (SMA), a total of 9 samples were prepared, including three mixture types (Pure, 5%PP, and 4.5%SBS) with three samples each (OBC, OBC+0.5, and OBC-0.5), mixed at 155°C and compacted at 145°C, all with a diameter of 15cm and compacted at 50 gyrations. The results were interpreted by calculating the workability indices using the formula $WI = (1/A) * 100$ at 30 and 50 gyrations. NPP-inclusive hot mixtures demonstrated a positive impact on workability, suggesting its potential use to enhance the mixture's workability. Similarly, it was observed that PP-inclusive hot mixtures exhibited a positive effect on workability, indicating the material's suitability as an additive. However, SBS-inclusive mixtures did not show a significant impact on workability.

Keywords: Asphalt, Bituminous Hot Mix, Pyrolysis, Waste plastics, Workability,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca; tecrübelerini ve deneyimlerini benden esirgemeyen, beni böyle bir konuda çalışmaya yönlendiren ve tez çalışmasının sonuna kadar beni her konuda destekleyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında, değerli görüşleri ile çalışmama önemli katkılarda bulunan saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında, bilgi birikiminden istifade ettiğim, her sorun karşısında bana rehberlik eden kıymetli hocam Arş. Gör. Hüseyin KÖSE'ye teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Bu tez boyunca, maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan, motivasyon kaynağım olan değerli arkadaşım Avukat Şükran Felek KARA'ya, deneysel çalışmalarda yardım sunan meslektaşım Hamidullah AFSARİ'ye ve çalışmalarım boyunca beni destekleyen arkadaşım Arş. Gör. Ramazan BARAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Bugünlere ulaşmamda, eğitim hayatımdaki başarılarımda büyük katkısı olan, zor anlarımda yanımda bulunan, her zaman maddi ve manevi desteklerini hissettiğim saygıdeğer aileme en içten duygularıyla teşekkür ediyorum.

Nasrat Jamal BEHZAD
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. PLASTİK VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ.....	3
2.1. Plastik.....	3
2.1.1. Atık plastikler ve geri dönüşümü.....	3
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği.....	6
2.2.1. İşlenebilirliği etkileyen faktörler	8
2.2.2. İşlenebilirlik ölçüm yöntemleri.....	12
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
4. ÇALIŞMA KAPSAMINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ VE AGREGA - BİTÜM DENEYLERİ	24
4.1. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri	24
4.1.1. Agregas.....	24
4.1.2. Bitümlü bağlayıcı.....	25
4.1.3. Plastikler	26
4.1.4. SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) veya Kraton.....	30
4.1.5. Selülozik elyaf	31
4.2. Agregas – Bitüm Deneyleri	33
4.2.1. Agregas deneyleri.....	33
4.2.2. Bitüm bağlayıcı deneyleri.....	40
4.2.3. Modifiye bitüm üretimi.....	46
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
5.1. Materyal	50
5.1.1. Agregas.....	50
5.1.2. Bitümlü Bağlayıcı	50
5.1.3. Plastik.....	50
5.1.4. Katkı maddesi	51
5.2. Yöntem.....	51
5.2.1. Agregas deneyleri.....	51
5.2.2. Bitümlü bağlayıcı deneyleri.....	51
5.2.3. Piroliz deney sistemi	52
5.2.4. Marshall tasarım yöntemi (TS 12697-30).....	54

5.2.5. Gyrotor Sıkıştırma Makinesi (<i>Gyratory Compactor Machine</i>)	58
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	63
6.1. Agrega Deneyleri	64
6.1.1. Elek analiz deneyi	64
6.1.2. Agrega deney sonuçları	65
6.2. Piroliz Deney Sonuçları	66
6.2.1. Atık naylon poşet pirolizi	66
6.2.2. Atık polipropilen pirolizi	69
6.3. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye İşlemleri.....	70
6.4. Bitüm Deneyleri.....	71
6.5. Marshall Tasarımı ve Sonuçları	72
6.5.1. Asfalt betonu Marshall deney sonuçları	72
6.5.2. TMA Marshall deney sonuçları	79
6.6. Gyrotor sıkıştırma makinesi ve sonuçları	80
6.6.1. Asfalt betonu GSM deney sonuçları	80
6.6.2. Taş mastik asfalt GSM deney sonuçları	84
6.6.3. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirlik hesabı	84
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
7.1. Asfalt Betonu Karışımın Marshall Sonuçları.....	89
7.2. AB ve TMA Karışımların İşlenebilirlik Sonuçları	90
KAYNAKLAR	91
EKLER	95
EK-1 Marshall Tasarım Tabloları.....	95
EK-2 TMA Karışımların GSM Tasarım Sonuçları.....	97
EK-3 AB Karışımların GSM Tasarım Sonuçları	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

KISALTMALAR

AB	: Asfalt Betonu
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AYPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
BBR	: Kiriş Eğilme Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışımlar
DSR	: Dinamik Kesme (kayma) Reometresi
DYPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
ELT	: Kullanılmış Lastik
GTM	: Gayrator Test Makinesi
GSM	: Gayrator Sıkıştırma Makinesi
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LDYPE	: Doğrusal Düşük Yoğunluklu Polietilen
LK	: Lastik Kırıntısı
NMAB	: Nominal Maksimum Agregat Boyutu
NPP	: Naylon Poşet Pirolyzi
OBİ	: Optimum Bitüm İçeriği
PB	: Polibitümlü
PET	: Polietilen Tereftalat
PP	: Polipropilen
PPP	: Polipropilen Pirolyzi
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinilklorür
RV	: Dönel viskometre
SBS	: Stiren Bütadien Stiren
SMA	: Stone Mastik Asphalt
TMA	: Taş mastik asphalt
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WI	: İşlenebilirlik İndeksi
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

1. GİRİŞ

Karayolu ulaştırma sistemi, yolcu ve yük taşıma açısından en yaygın biçimde kullanılan bir ulaştırma türüdür. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK) karayolları esnek üstyapı tabaksı yapımında kullanılan bir karışım türüdür. BSK retiminde, 145-160°C sıcaklıkta agregalar kurutulup ısıtılmış bir Şekilde ve yaklaşık olarak aynı sıcaklıkta bitüm amacına uygun bir Şekilde yeterli akışkanlığı kazandırmak için ısıtılır ve karışımın tasarımı oranlarına uygun olarak bir plentte (karışım tesisi) karıştırılır. Plentte karıştırma süresi bittikten sonra BSK kaplama alanına taşınır ve düzgün, üniform bir yüzey oluşturabilmek için bir finişer (kaplama makinesi) yardımıyla serilir. Karışım daha sıcaklığını kaybetmeden iyi sıkıştırılmış ve pürüzsüz kaplama tabakası elde edebilmek için sıkıştırma işlemi ağır motorlu silindirler ile yapılmaktadır. BSK'nın çok geniş kullanım alanı vardır, özellikle yüksek kaliteli karayolları, uçak pistleri ve yarış pistleri gibi kaplamalar BSK ile inşa edilmektedir (URL 1; Yener, 2010).

Dünyada her yıl yaklaşık olarak 1,5 milyar ton BSK retilmektedir. En çok üretim sırasına göre Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da üretilmektedir. Türkiye'de ise 2021 yılı verilerine göre 30,3 ton/yıl BSK retilmiştir. Bazı ülkelerin 2017-2021 yılları arasında üretilen Asfalt verileri izelge 1.1'de görülmektedir (Mirzadeh, 2014; EAPA, 2021).

Çizelge 1.1. 2017-2021 yılları verilerine göre Asfalt retimi (EAPA, 2021)

lke	2017	2018	2019	2020	2021
ABD	344	353	382	370	392
Almanya	42	41	40	38	38
Türkiye	46,9	41,7	32,7	31,7	30,3
İngiltere	22,7	22,9	25,2	23	25,7
Norveç	7,8	7,5	7,7	6,9	6,9
Fransa	33,7	35	35,8	31,9	34,7
Avrupa Birliği	296,7	297,9	288,9	276,9	290,6

Sıcak karışımların hizmet ömürleri boyunca iyi performans göstermeleri için yapım ve serme işlemleri sırasında yeterince işlenebilir olması gerekmektedir. Serim aşamasında sıkıştırma zorluğu, segregasyon, yüksek boşluk oranı, yüksek geçirgenlik, przly bir yüzey, düşük durabilite ve performans kaybı gibi sorunları önlemek için bitümlü sıcak karışımların serme ve sıkıştırma aşmasında optimum sıcaklıkta optimum miktarda işlenebilir olması gerekmektedir. Bunun yanında bir kaplamada kullanılacak malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için veya bazı katkı maddeleri ilave ederek

karışımın modifiye edilmesi yoluyla hizmet ömrünü ve performansını artırmak mümkündür.

Son yıllarda, artan nüfus ve yaşam standartlarındaki değişiklikler, plastik tüketimini büyük ölçüde artırmıştır. Bu durum, plastik atıkların çevresel sorunlara neden olmasıyla birlikte, mevcut kaynakların hızla tükenmesine ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Plastik atıkların geri dönüşümü, bu sorunların çözümüne yönelik önemli bir adım olabilir. Bu çalışma, atık plastiklerin piroliz işlemiyle elde edilen malzemelerin, bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Atık naylon poşet plastikleri, farklı türlerdeki plastikleri içerecek şekilde belirli oranlarda ve aynı şekilde atık plastik polipropilen piroliz deneyine tabi tutulmuştur. Piroliz sonucunda elde edilen katı malzemeler, modifiye bitüm üretiminde kullanılmıştır. Bu modifiye bitümler ile asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışımları üretilmiştir ve işlenebilirlikleri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliğini değerlendirmek amacıyla Gayrator sıkıştırma makinesi (GSM) kullanılmıştır. Asfalt betonu (AB) ve taş mastik asfalt (TMA) için farklı modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların işlenebilirlik indeksleri belirlenmiştir. Ayrıca, karışımların fiziksel özellikleri, penetrasyon, yumuşama noktası, yoğunluk, boşluk oranı, akma ve stabilite gibi parametreler üzerinde yapılan deneylerle incelenmiştir.

Bu çalışma, atık plastiklerin piroliz sonucu elde edilen malzemelerin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkilerini anlamak ve sürdürülebilir çözümler geliştirmek adına önemli bilgiler sunmaktadır.

2. PLASTİK VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ

2.1. Plastik

Plastik gün geçtikçe kullanımını artan ve hayatımızın her alanında yer alan, herhangi sentetik ve yarı sentetik bir polimerdir. Plastiklerin geniş bir kullanım alanının sahip olmasının sebeplerinden başlıca kolayca biçimlendirilen, hafif oldukları için uzak mesafeleri rahatlıkla taşınması, dayanıklılık ve kalıba dökülebildiğinden üretim kolaylığı gibi sebepler yer almaktadır. Plastikler organik ürünler olmakla birlikte kömür, selüloz, doğal gaz, tuz ve tabii ki en çok ham petrol gibi doğada bulunan kaynaklardan yapılır. Dünyada üretilen petrolün yaklaşık olarak %4'ü sadece plastik yapımında kullanılmaktadır. Plastikler hidrojen, karbon, azot, oksijen ve diğer organik veya inorganik elementlerin oluşturduğu basit yapıdaki moleküllü gruplardaki bağın (monomer) koparılarak zincirli ve uzun bir yapıya (polimer) dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelerdir. Plastik kelimesi, Yunanca "plastikos" kolayca biçimlendirilen kelimesinden geliyor. Plastiğin temel özellikleri, ısı ve basınç etkisiyle yumuşatılıp ve çeşitli tekniklerle biçimlendirilen ve soğuyunca da aldıkları biçimlerini koruyabilen organik malzemelerdir (Güler ve Çobanoğlu, 1997; URL 2).

Plastiklerin aşağıda sıralanmış avantajları, kullanımının artmasında önemli rol oynamaktadır (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

- Hafif oldukları için taşıma maliyeti oldukça düşüktür.
- Esnek ve rijit oldukları için istenilen şekilde biçimlendirilir.
- Dayanıklı oldukları için, güvenli bir kap oluşturulabilir.
- İyi yalıtkan bir malzemedir.
- Mikrodalga fırında ve nemli yiyecekler kullanımında elverişlidir.

2.1.1. Atık plastikler ve geri dönüşümü

Günümüzde nüfus artışına bağlı olarak artan tüketim ve yaşam standartlarındaki değişim gibi faktörlerden dolayı plastiklerin tüketimi oldukça artmıştır. Bununla birlikte mevcut kaynakların hızlı bir şekilde tüketimi, çevre ve görüntü kirliliği gibi evrensel sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeplerden dolayı plastik atıkların geri dönüşümü hem ekonomik hem de çevresel bakımdan büyük önem arz etmektedir. Plastikler çözülmezler ve doğada kaybolma süreleri oldukça uzundur. Bazen plastikler doğada bin yıl bozulmadan kalabilirler. Bu yüzden doğaya atılmaları durumunda çevre ve görüntü kirliliği gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Plastik atıkların yakılması durumunda hava

kirliliğine neden olmaktadır. Denize atılan plastikler çoğu deniz canlıları tarafından gıda algılayıp yiyerek boğulabilmektedir. Ve uzun yıllar sonra güneş ışığının etkisiyle denizdeki plastiklerin kimyasal yapıları bozularak mikro plastiklere dönüşmektedir. Son yıllardaki yapılan araştırmalara göre çoğu deniz canlılarının vücudunda mikro plastiklere rastlanmaktadır. Deniz canlıların gıda zincirine katılarak insan sağlığını olumsuz etkilenmektedir. Plastiklerin denize atılmaları durumunda deniz ekosistemini çok ciddi bir şekilde zarar vermektedir (URL 3).

Çizelge 2.1’de belediye atık göstergeleri 2016 ve 2018 yıllarına göre gösterilmiştir (URL 4, 2019).

Çizelge 2.1. Belediye Atık Göstergeleri 2016 ve 2018 yıllarına göre (URL 4, 2019).

Belediye atık göstergeleri 2016, 2018 yılı verilerine göre		
	2016	2018
Belediye sayısı	1397	1399
Atık hizmeti veren belediye sayısı	1390	1395
Atık hizmeti verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranı (%)	98,6	98,8
Toplanan atık miktarı (Bin ton)	31584	32209
Kişi başına ortalama atık miktarı (kg/kişi-gün)	1,17	1,16
Toplanan atığın bertaraf ve geri kazanım yöntemlerine göre oranı (%)		
Düzenli depolama tesisine gönderilen	61,2	67,2
Belediye çöplüklerine gönderilen	28,8	20,2
Geri dönüşüm tesislerine gönderilen	9,8	12,3
Diğer bertaraf yöntemleri	0,2	0,2

TÜİK'in 2018 yılı belediye atık verilerine göre, Türkiye'deki atık hizmeti veren 1399 belediye arasında 1395 belediyenin topladığı atık 32,2 milyon ton olarak belirlenmiştir. Bu istatistiklere göre kişi başı günlük toplanan atık 1,16 kg olarak hesaplanmıştır. Kişi başı günlük toplanan atık miktarı üç büyük şehirde ise İstanbul 1,28 kg, Ankara 1,18 kg ve İzmir 1,36 kg olduğu tespit edilmiştir. Atık hizmeti verilen belediyeler tarafından toplanan 32,2 milyon ton atığın %67,2'si düzenli depolama tesislerine, %20,2'si belediye çöplüklerine ve %12,3'ü geri dönüşüm tesislerine gönderilirken, %0,2'si ise açık havada yakılma, gömülme, dereye ve araziye dökülme işlemleri ile bertaraf edilmiştir.

2.1.1.1. Plastik Geri Dönüşüm Aşamaları

- Plastik atığın içindeki malzemeler boşaltılır.
- Taşımadan tasarruf etmek amacıyla biriktirme kumbaralarına iyice sıkıştırılarak yerleştirilir.
- Plastik atıkları sarı renklerdeki kumbaralarda biriktirilir.

- Plastik atıkları geri dönüşüm tesisine gönderilir.
- Plastik atıkları türlerine ayrıştırıldıktan sonra geri dönüşüm işlemi başlatılır.
- Atık plastikler türlerine göre ayrıldıktan sonra makineler vasıtasıyla küçük parçalara kırılır.
- İşletmeler tarafından bu küçük parçalar belirli oranlarda orijinal hammaddeler ile karıştırılarak üretim yapılabilir veya katkı maddeler katılıp eritildikten sonra ikinci sınıf hammadde olarak da kullanılabilirler.

Şekil 2.1’de Plastik geri dönüşüm aşmaları gösterilmiştir (URL 3).



Şekil 2.1. Plastik geri dönüşüm aşmaları (URL 3)

2.1.2.2. Atık Plastikler

Atık plastik malzemeleri olarak sayılan plastikler. (URL 3; URL 5)

- Pet şişeler
- Şişe kapakları
- Su damacaneleri
- Ambalajlar
- Naylon poşetler
- Plastik kutular
- Pet bardaklar
- Kişisel bakım ürünleri ambalajları
- Plastik oyuncaklar
- Temizlik malzemeleri ambalajlar

2.1.2.3. Plastik Geri Dönüşüm Şeması

Yapısal olarak bütün plastikler aynı değildir ve her biri farklı kimyasal bağlara sahiptir. Bu nedenle hepsi aynı şekilde geri dönüşüm işlemine tabi tutulamaz. Çizelge 2.2’te plastik türlerine göre geri dönüşüm oranları gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Plastik geri dönüşüm şeması (URL 5).

Plastik Türü	Özellikler	Kullanım Alanları	Geri Dönüşüm Oranları
Polietilen Tereftalat (PET)	Sert ve şeffaf bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • İçecek şişeleri • Halatlar • İlaç şişeleri • Halı elyafları • Kıyafetler 	Hemen hemen çoğu geri dönüşüm programları tarafından toplanmaktadır
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)	Sıradan beyaz ya da renkli bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Süt şişeleri • Deterjan şişeleri • Şampuan şişeleri • Çamaşır suyu şişeleri • Sabun şişeleri 	Hemen hemen bütün geri dönüşüm programları tarafından toplanmaktadır ancak bazen sadece boyunlu olan şişeler geri dönüştürülmektedir.
Polivinilklorür (PVC)	Katı ve sert bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Gıda dışı şişeler • Pencereler • Borular 	Geri dönüşüm programları tarafından yaygın olarak geri dönüştürülmez ancak Avrupa PVC endüstrisinde VinylPlus gibi programlar yoluyla sıklıkla geri dönüştürülmektedir.
Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE)	Yumuşak ve esneyebilen bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Sterç filmler • Plastik torbalar • Sandviç kutuları • Sıkılabilir ürün şişeleri 	Genellikle geri dönüşüm programları tarafından geri dönüştürülmez ama bazı ülkeler tarafından kabul edilmektedir. Plastik alışveriş torbaları, geri dönüşüm amacıyla birçok markete geri götürülebilir.
Polipropilen (PP)	Sert fakat esneyebilen bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Yoğurt kapları • Plastik şişe kapakları • Margarin Kutuları 	Bazı geri dönüşüm programları tarafından geri dönüştürülür
Polistiren (PS)	Yumuşak ve esneyebilen bir plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Kâğıt bardaklar • Paketleme köpüğü • Plastik çatal- bıçaklar 	Bazı geri dönüşüm programları tarafından geri dönüştürülmektedir.
Çeşitli Plastikler	Naylon ve akrilik dâhil diğer tüm plastik çeşididir	<ul style="list-style-type: none"> • Biberonlar • Damacanalara • Kompakt diskler 	Daha önce geri dönüştürülmezdi ama geri dönüşüm programları tarafından kabul edilmeye başlandı.

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik kavramı bitümlü karışımların karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kolayca ve minimum enerji ile gerçekleştirilebilirliğini ifade etmektedir. Depolama ve taşıma süreçlerinde iri ve ince agregaların ya da bitümlü bağlayıcının karışımdan ayrılarak bir tarafta toplanması şeklinde meydana gelen segregasyonlar da işlenebilirlik kavramının bir parçası olarak içinde değerlendirilebilir.

Heukelom (1965), Bitümlü sıcak karışımları tanımlamak için “yayılabirlik” ve “sıkıştırabilirlik” kavramlarını kullanmıştır. Yayılabirlik “ karışımın serme aşamasında kolayca serebilme ve agregaların düzenli ve homojen bir şekilde yerleştirebilme özelliğine” , sıkıştırabilirlik ise “ karışımın sıkıştırma esnasında silindir ağırlığı altında yoğun bir yapı oluşturulabilme özelliğine” denilir.

Cabrera (1991), işlenebilirliği, minimum bir enerji uygulanarak bir karışımı yerine yerleştirebilme ve sıkıştırabilme gibi işlemleri kolayca yapabilme imkânını sağlayan karışım özelliği olarak tanımlamıştır.

Gudimetta (2003), işlenebilirliği, “ karışımın arazi şartlarında karıştırma, taşıma, yerine yerleştirme ve sıkıştırma kolaylığı” olarak tanımlamıştır.

Kaplamanın sıkıştırma sırasında yeterli yoğunluk ve düzgün bir yüzey elde etmek amacıyla karışımın yeterli derecede işlenebilir olması gerekmektedir. Düşük işlenebilirliği sahip karışımlarla düzgün bir yüzey elde edebilmek oldukça zordur. Böyle bir karışımın sıkıştırılması sonunda boşluk oranı fazla olmaktadır, dolayısıyla durabilite ve performans düşüklüğü gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Roberts ve ark.,1996).

Uygun bir şekilde sıkıştırılmayan karışımlarda hizmet ömrünü olumsuz etkileyecek geçirimsizlik ve yaşlanma gibi sorunlar gözlenmektedir.

Bitümlü karışımı oluşturan malzemelerin oranı değişmedikçe sıcaklığını arttırarak işlenebilirliği iyileştirilebilir. Ancak sıcaklığın artışı bazı sorunlara yol açmaktadır (Asphalt Handbook, 1989; Terrel ve ark., 1988).

- Bitümlü bağlayıcının aşırı yaşlanması
- Modifiye katkıların yapısının zarar gömesi
- Enerji artışı
- Aşırı dumanın çıkması
- Zararlı gazların salınımı

Bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları genelde bitümlü bağlayıcının viskozitesi esas alınarak belirlenmektedir. İşlenebilirlik, bitümlü bağlayıcının viskozitesinin yanında bir de karışımı oluşturan malzemelerden etkilenmektedir. Bu nedenle bitümlü karışımların işlenebilirliğini değerlendirirken karışımı bir bütün olarak ele almak gerekir (Anonymous, 2010).

2.2.1. İşlenebilirliği etkileyen faktörler

İşlenebilirlik üzerinde birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır ve bunun sonucunda bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliğini etkileyen en önemli unsurlar aşağıda sıralanmıştır (Yener, 2010).

- Karışımı oluşturan malzemelerin miktarı
- Karışımı oluşturan malzemelerin özellikleri
- Çevre şartları
- Üretim aşamalarında uygulanan işlemler

Bitümlü sıcak karışımların yaklaşık %95'ini agrega taneleri oluşturmaktadır, bu yüzden agrega özellikleri karışımın özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.

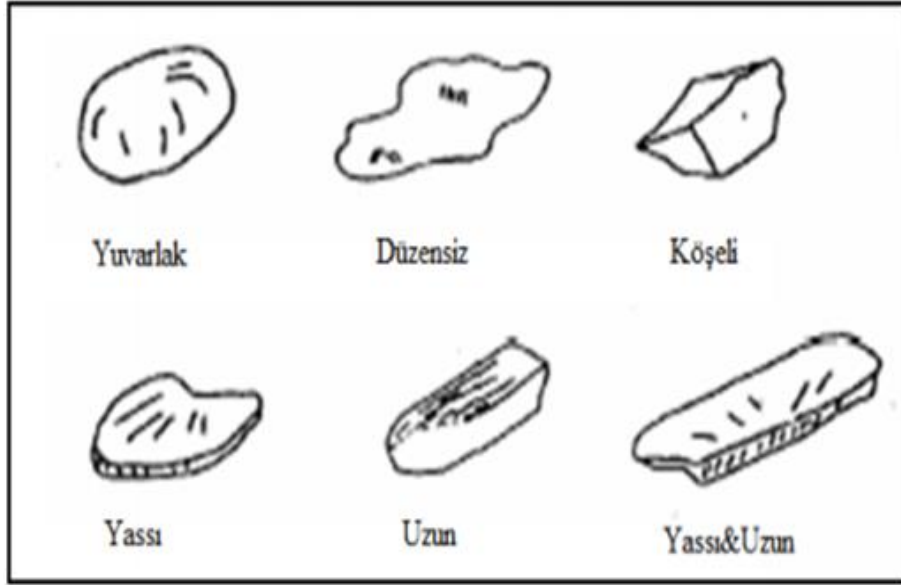
2.2.1.1. Agreganın maksimum tane boyutu

Karışımın maksimum agrega tane boyutuna ifade etmek amacıyla farklı iki simge kullanılır.

- (Dmax): Maksimum agrega tane boyutu, tanelerin hepsinin geçtiği en küçük standart elek çapıdır.
- NMAB: Nominal maksimum agrega boyutu, tane dağılımına göre üzerinde ağırlıkça %10'dan daha fazla malzeme kalan ilk eleğin hemen bir üstündeki bulunan eleğin çapıdır. NMAB belli bir agrega tipi, tane dağılımı ve bağlayıcı tipi artıkça, işlenebilirlik azaltmaktadır (Gudimettla ve ark., 2003).

2.2.1.2. Agreganın tane şekli

Agrega taneleri uzun, yuvarlak, yassı ve köşeli gibi şekillere sınıflandırılır. Agregaların tane şekli en büyük boyutun en küçük boyuta oranı ile ifade edilmektedir. En büyük boyutun en küçük boyuta oranı 3'ten fazla olan agrega taneleri kusurlu taneler olarak adlandırılır. Bazı agrega tane şekilleri üretilen bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliğini doğrudan etkilenmektedir. Köşeli taneli agrega kullanılarak hazırlanmış karışımlar, yuvarlak taneli dere agregası kullanılarak üretilen karışımlara kıyasla daha kötü bir işlenebilirliği sahiptir (Ballie, 1990; Siswosoebrotho, 2005; Chatterjee,2006).



Şekil 2.2. Agregatane şekilleri (Tunç, 2004)

Yassı agrega oranı bir karışımın içerisinde yükseldikçe işlenebilirlik değerleri düşmektedir (Siswosoebrotho, 2005).

2.2.1.3. Agregatayüzey pürüzlülüğü

Agregatayüzey pürüzlülüğü de işlenebilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü yüksek olan agregalar ile hazırlanan karışımın içsel sürtünme açısı artmaktadır. Dolayısıyla karışımın rijitliği yükselir ama sıkıştırabilirliği ve işlenebilirliği azalmaktadır. Fakat Superpave dane dağılım eğrilerinin yasak bölgenin üzerinde kalan gradasyonlar için 4,75mm üzeri olan agreganın dere agregası ya da kırmataş agregası olması İşlenebilirliği etkilememiştir (Gudimettla ve ark., 2003).

2.2.1.4. Agregaların tane dağılımı

Yapılan deneysel çalışmalara göre, agrega tane dağılımının karışımın işlenebilirliği üzerindeki etkisi önemli seviyede olmadığı tespit edilmiştir (Chatterjee ve ark, 2006).

Optimum bitüm içeriğinde agrega tane dağılımının işlenebilirlik indeksi üzerinde önemli bir etkisi yoktur (Setiawan ve ark., 2016).

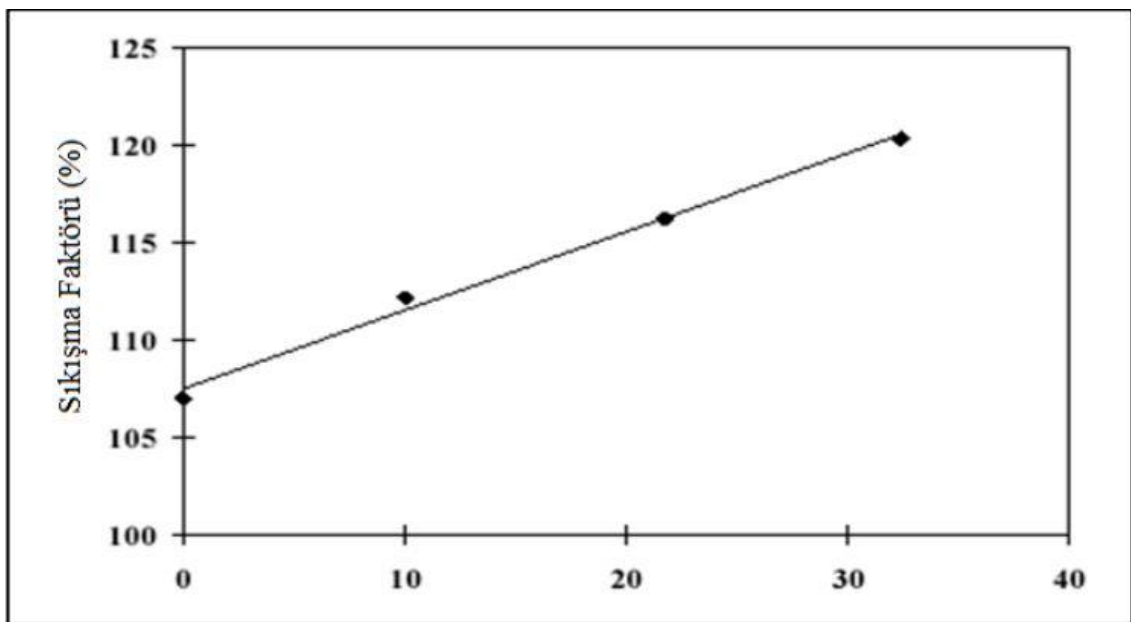
Bir bitümlü sıcak karışımın içerisindeki taş ve kum fraksiyonu yüksek olduğu zaman, işlenebilirliği düşmektedir. Çünkü agregalar arasında sıkıştırma ve yer değiştirmesini zorlaştıracak bir kilitleme meydana gelmektedir (Haryanto ve ark., 2007)

2.2.1.5. Agreganın porozite oranı

Yüksek poroziteye sahip agregalar ile üretilen karışımların işlenebilirliği daha azdır, bunun sebebi de karışımında kullanılan bağlayıcı malzemenin bir miktarı agregalar tarafından emilir. Bu yüzden karışımdaki agrega tanelerinin porozitesi arttıkça karışım daha rijit olur ve daha zor sıkıştırılabilir. Bir de agregaların porozitesi arttıkça yüzey pürüzlülüğü yükselir ve bu da işlenebilirliğin azalmasına neden olmaktadır (Yener, 2010).

2.2.1.6. Karışımında kullanılan fillerin etkisi

Asfalt karışımları için maksimum sıkıştırmanın gerçekleştirebileceği uygun bir kohezyon değeri bulunmaktadır. Bir karışımında kullanılan filler oranı bu kohezyon değeri üzerinde etkisi vardır. Dolayısıyla bağlayıcı fazın (bitüm oranı ve filler oranı) hacmi sabit tutulduğunda maksimum sıkıştırmanın gerçekleşeceği uygun bir filler miktarı belirlenebilmektedir (Santucci, 1962). Yapılan bazı çalışmaların sonucunda, bir karışımdaki filler miktarı arttıkça sıkışma (kompaksiyon) faktörünün arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.3). Kompaksiyon faktörü, üretilen Marshall numunelerin 5 darbeden sonraki hacminin 100 darbeden sonraki numune hacmine oranlamasıyla belirlenen bir değerdir. Kompaksiyon faktöründeki artış, sıkıştırmanın zorlaştığının göstermektedir (Heukelom 1965). Bu durumun sebebi karışımdaki filler miktarı arttıkça karışım daha rijit bir hale gelmesinden kaynaklanır. Bu nedenle karışımın işlenebilirliği düşer ve sıkıştırılması zorlaşır (Heukelom,1965; Marvillet,1979; Chadbourn,1998).



Şekil 2.3. Sıkışma faktörü- Filler hacmi ilişkisi (Yener, 2010)

2.2.1.7. Bitümlü bağlayıcının etkisi

Bitümlü bağlayıcının viskozite değeri yükseldiğinde karışımın işlenebilirliği azalmaktadır (Marvillet, 1979; Chatterjee, 2006). Modifiye bitüm kullanımı, genel olarak bağlayıcının viskozite değerini artırdığı için işlenebilirliğin düşmesine neden olmaktadır. Aynı şekilde Marvillet (1979) tarafından bağlayıcı miktarı ile işlenebilirlik arasındaki ilişki de incelenmiştir, yalnız aralarında etkili bir bağ tespit edilmemiştir.

2.2.1.8. Karıştırma şekli

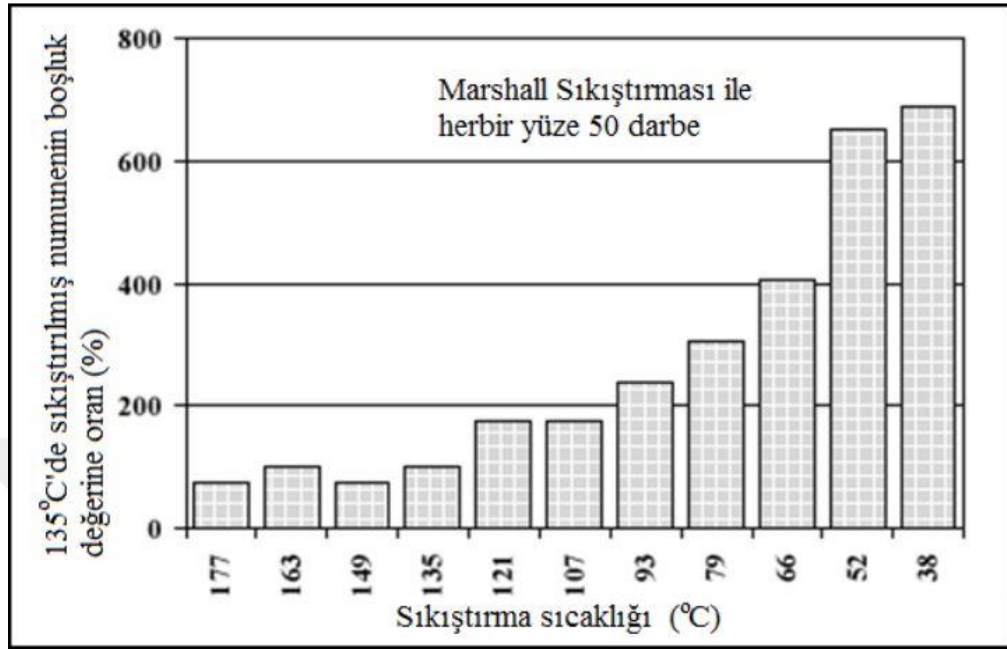
Aynı malzeme oranları ile üretilen bir karışımın, merkezi karıştırma tesisinde karıştırılan numuneler laboratuvarında karıştırılan numunelere göre davranışları daha farklı görülmüştür. Plentte üretilen karışımlar laboratuvarında üretilen karışımlara göre daha az boşluklu olmuşlardır (Ballie, 1990).

2.2.1.9. Sıcaklık etkisi

Bir karışımın sıcaklığı işlenebilirliğin değerlendirilmesi için en önemli parametre olarak bilinmektedir. Serme ve sıkıştırma işlemi sırasında karışım sıcaklığı bir dizi faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktör arasında karışım plentin koşulları, kaplamada kullanılan yöntem, sıcak karışımın termal özellikleri, kaplama kalınlığı, kaplama tabakasının yoğunluğu ve iklimsel ve çevresel koşullar (hava sıcaklığı, temel tabakasının sıcaklığı, rüzgâr hızı ve solar radyasyon) gibi bulunmaktadır. Karışımın sıcaklığı çok az olduğunda karışım sıkıştırılamaz bir hale gelmektedir. Ancak karışımın sıcaklığı çok fazla olduğunda, karışım sıkıştırıcı silindirleri taşıyamayacak bir hale gelmektedir. Bu durum en yüksek yoğunluğun sağlanacağı ideal sıcaklığın belirlenmesi ve belirlenen sıcaklıkta sıkıştırma işleminin gerçekleştirilmesinin önemini anlatmaktadır.

Sıkıştırma sıcaklığı, bir kaplamanın hacimsel özelliklerini belirlemek konusunda en önemli parametredir. Eğer sıkıştırma sıcaklığı istenen sıcaklıktan düşükse, karışımın yoğunluğu azalır ve boşluk oranı artmaktadır (Rahmat ve ark., 2019).

Parker (1960) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı sıkıştırma sıcaklıklarında Marshall sıkıştırma deneyleri yaparak karışımların boşluk oranının üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Sıkıştırma sıcaklığının boşluk oranına etkisi (Yener, 2010)

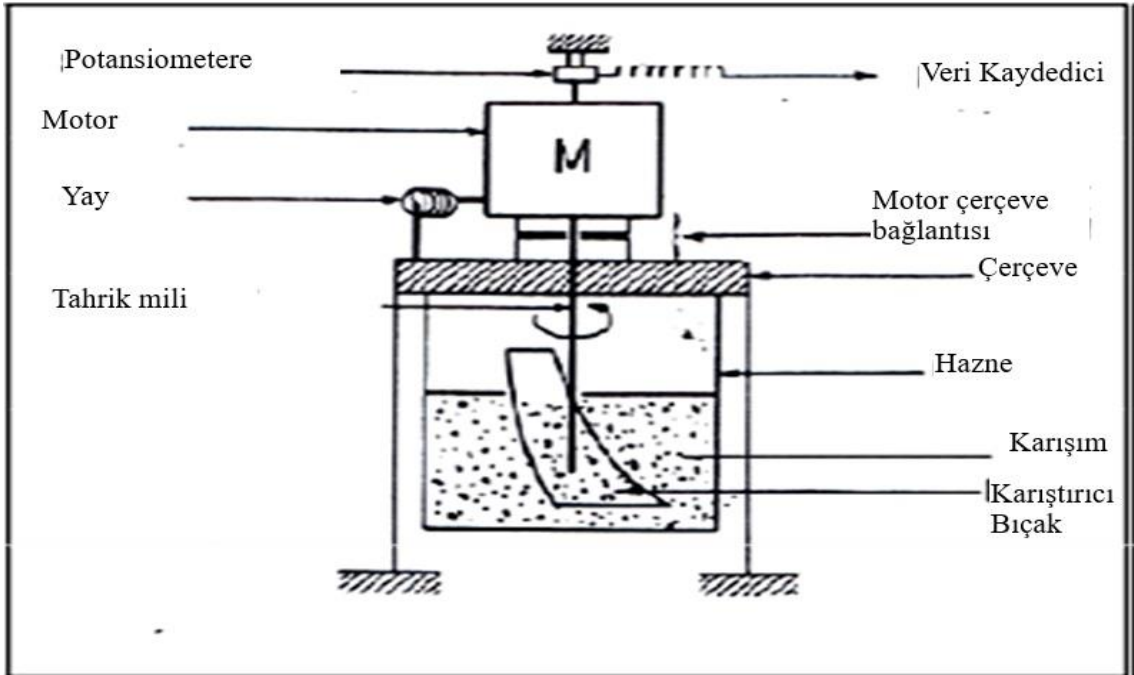
Yapılan çalışmada, 93,3°C bir sıcaklıkta sıkıştırılan bir numunenin boşluk oranı, 135°C bir sıcaklıkta sıkıştırılan bir numunenin boşluk oranına göre 2,4 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. 79,4°C bir sıcaklıkta sıkıştırılan bir numunenin boşluk oranı 135°C bir sıcaklıkta sıkıştırılan numuneye göre dört kat daha yüksek olduğu görülmüştür. McLeod (1967) gerçekleştirdiği çalışmada, bir yol kaplamasının boşluk oranı çok fazla olursa iki yıldan sonra bozulmaya başladığı sonucuna varılmıştır. Düşük sıcaklıklarda sıkıştırılan asfalt betonlarının eğilme direncinin ve esneklik modülünün düştüğü gözlemlenmiştir (Cabrera, 1991).

2.2.2. İşlenebilirlik ölçüm yöntemleri

Karışımın işlenebilirliğini tayin etmek için birbirinden çok farklı yöntemler kullanılmıştır.

Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliğini ölçmek için ilk defa Marvillet ve Baugalt tarafından 1978 yılında bir aparat geliştirildi. Aletin alt kısmında sert bir çerçeveye tutturulmuş bir bölme ve üst kısmında da monte edilmiş bir motor, karışımın içinde bir bıçak sabit bir dönme hızında döndürür. Deney için kullanılan karışım ağırlığı 15kg ve karışımın yerleştirildiği tüm bölme, karışımın sıcaklığını 1°C/dakika oranında yükseltmek için ısıtılır. Sıcaklık 150°C'den 200°C'ye yükseldikçe test sonuçları

kaydedilir. Bu çalışmada işlenebilirlik karışımın bıçağın dönmesine karşı gösterdiği direncin (tork) tersi olarak değerlendirilmiştir. Buna göre eğer tork fazla ise, işlenebilirlik düşüktür.



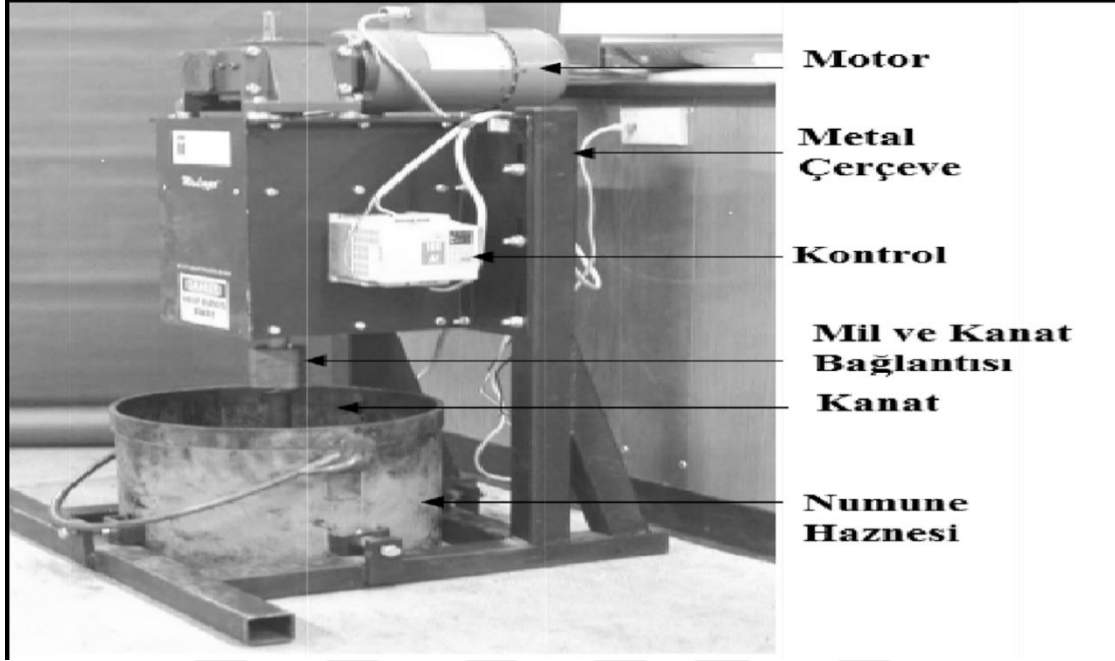
Şekil 2.5. Marvillet tarafından geliştirilen işlenebilirlik aparatı (Gudimetta ve ark., 2003)

Marvillet ve Baugalt çalışmasının sonuçları:

- Bağlayıcının viskozite derecesi düştükçe, karışımın işlenebilirliği artar.
- Bağlayıcının içerisindeki herhangi bir değişiklik doğrudan işlenebilirliğe bir etkisi yoktur.
- Karışımın içerisindeki filler (ince madde) oranı arttıkça, işlenebilirlik azalmıştır.
- Köşeli agregalar ile üretilen karışım, yarı köşeli ve yuvarlak agregalar ile üretilen karışıma göre daha az işlenebilirliği sahiptir.

Tattersol ve Banfill (1999) iki-nokta işlenebilirlik metodunu taze betonların işlenebilirliğini belirlemek amacıyla geliştirmiştir. Bu yöntemde yukarıda bahsedilen metoda benzer şekilde, bir hazne içindeki taze betona daldırılan belirli bir geometrideki karıştırma pervanesini sabit bir açısal hızda döndürebilmek için gerekli gücün (tork) tespitini esas alan bir yöntemdir. Karışım içinde daldırılan pervaneyi farklı hızlarda döndürmek için gerekli tork tespit edilmiş, elde edilen sonuçlar yardımıyla dönme hızı-tork grafiği çizilerek işlenebilirliği değerlendirmek üzere kullanılmıştır (Tattersol ve Banfill,1999).

Gudimettla ve ark. (2003), beton için kullanılan iki nokta işlenebilirlik deney cihazında bazı değişiklikler yaparak, bu yöntemi bitümlü sıcak karışımlar için uyarlamışlardır (Gudimettla ve ark., 2003). Geliştirilen prototip işlenebilirlik cihazı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Prototip işlenebilirlik aleti (Gudimettla ve ark., 2003)

Gudimettla ve ark. (2003), çalışma sonuçları:

- Agrega tipinin bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği üzerinde önemli ölçüde etkisi vardır.
- Yarı köşeli ve kırılmış agregası kullanılarak üretilen karışımlar, Kübik köşeli granit agregası kullanılarak üretilen karışımlara kıyasla daha çok işlenebilir oldukları gözlemlenmiştir.
- Nominal maksimum agregası boyutu belli bir agregası tipi, tane dağılım şekli ve bağlayıcı tipi için yükseldikçe, işlenebilirlik azalmıştır.
- Tane dağılım şeklinin işlenebilirlik üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.
- Bitüm bağlayıcı türünün işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.
- Karışımın sıcaklığı karışımın işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemiştir. Sıcaklık arttıkça, karışımın işlenebilirliği de artmıştır.

Cabrera (1991) bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliğini ölçmek için Leeds üniversitesinde Gyrator Test Makinesini (GTM) kullanmıştır. Bu yöntem, sıkıştırma enerjisi ve karışımın porozitesi arasındaki deneysel ilişkilere dayanmaktadır. Karışımın işlenebilirliğini belirlemek için numune sıkıştırılır ve numune sıkıştırılırken yüksekliğindeki değişiklikleri izlemek için cihazın bir ekranı vardır.

Karışımın işlenebilirliği, İşlenebilirlik indeksi (WI) ile ifade edilir. WI, karışımın sıcaklığı ve sıkıştırma enerjisinin etkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Genel olarak herhangi bir bitümlü sıcak karışımın işlenebilirlik indeksini artırmak için bağlayıcının içeriği ve sıkıştırma sıcaklığını artırmak yeterlidir.



Şekil 2.7. Gyrator test makinesi (Leeds Üniversitesi Laboratuvarı)

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Akmaz (2020) yaptığı çalışmada polietilen tereftalat (PET), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve Polipropilen (PP) plastik atıklarını belirli oranlarda karıştırıp, ikili ve üçlü şekilde oranlayarak piroliz işlemini gerçekleştirmiştir. Piroliz işlemin sonunda elde edilen katkı maddeleri ile hazırlanan modifiye bitümü ve bitümlü sıcak karışımlara uyguladığı bazı deneylerden şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Katkıların az da olsa, işlenebilirliğe olumlu etkileri kaydedilmiştir.
- Tüm katkılı bitümlerde, saf bitüme kıyasla penetrasyon değerlerinin düştüğü ve yumuşama noktalarının yükseldiği gözlemlenmiştir.
- Saf bitüme göre; tüm katkılı bitümlerde (60°C -75°C) arasındaki sıcaklıklarda viskozite değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak 90°C sıcaklıktan sonra sadece (YYPE–PET) katkılı bitümlerde ve 120°C sıcaklıktan sonra da (PP–YYPE–PET) katkılı bitümlerde viskozite değerlerinin düştüğü tespit edilmişken (PP–YYPE) ve (PP–PET) katkılı bitümlerin bütün sıcaklıklarda viskozite değerlerinin yükseldiği görülmüştür.
- Saf bitüme kıyasla, sıcaklık artışı ile katkılı bitümlerde bütün sıcaklıklardaki viskozite değişim yüzdelerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle sıcaklık artıkça, katkılı bitümlerin viskoziteleri, saf bitümün viskozitesine daha da yaklaşmıştır.

İnkaya (2016) yaptığı çalışmada, iki önemli sonuca varmıştır. Marshall dayanım değerleri PET ile hazırlanan numunelerde yükselirken, akma değerleri ise teknik şartname sınırları içinde kalmıştır. İkincisi ise bu dayanım değerlerinin az bir bitüm oranı ile elde edilmesidir. Dolayısıyla, atık plastikleri bitümlü sıcak karışımlarda bir bağlayıcı malzemesi olarak değerlendirebilir olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca 1 km yol inşası için kullanılan bitüm maliyeti 34871,76 TL'dir. Bitüm yerine atık plastik kullanıldığı takdirde bitüm maliyetinde %32 bir kazanç sağlanmaktadır. Bu şekilde 23,13253 ton atık plastiklerden, çevreyi görüntü kirliliğinden kurtarılırken hem ekonomiye büyük bir fayda sağlanacaktır. Ayrıca atık malzemelerin depolanma gibi maliyetli işlemleri ortadan kaldırılacaktır. Fakat, atıkların önceden işlenmesi (granül haline getirilmesi) ve uygun sonuçlar elde edebilmek için karışım plentinde ısıtma ünitesi eklemek gibi faktörler, maliyet artırıcı unsurlardır.

Hassani ve ark. (2005), evsel atıkların ve çöp şişelerin yüksek bir hacmi kapsadıkları gerekçesiyle bir milyon m^3 'ten fazla depo alanının bertaraf etmek amacıyla PET'ten üretilmiş şişeleri kullanarak yeni bir çalışmaya girişmiştir. Bu çalışma kapsamında, bitümlü karışımlarda PET atıkları agrega yerine kullanılmıştır ve böylece PET atıklarının çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılabileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada kullanılan PET atıklar yaklaşık 3 mm çapında granül bir hale getirilerek karışımda agrega görevini üstlenmiştir. Kaba agreganın %20' si yerine PET granülleri eklenmesi sonucunda, köprü ve asfalt yapımında kullanılan plasipalat karışımının birim ağırlığını %2,8 oranında azaltmıştır. Diğer taraftan, bitümlü karışımların yapımında en fazla kullanılan agrega 1 km yol yapımı için 125.000 ton gerektirmektedir. Bu çalışma sonuçlarına göre, eğer %5 agrega yerine 315 ton PET malzemesi kullanılırsa, 625 ton doğal kaynağı korunması sağlanacaktır. Ayrıca bu PET şişelerini depolamak için gereken 9450 m^3 depo alanına ihtiyaç duyulmayacağı anlamına gelmektedir. Yapılan deneyler sonucunda, numunelerde eklenen PET miktarı yüzdesi artıkça Marshall Stabilesinin düştüğü, akışkanlığın yükseldiği ve yoğunluğunun düştüğü gözlemlenmiştir.

Vargas ve ark. (2013) yaptıkları araştırmada; bitüm modifiye katkısı olarak farklı polietilenler üzerinde analizler yapmışlardır. Bu analizlerin sonucunda bitümün yumuşama noktasının arttığı ve penetrasyon derecesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Floresan mikroskobu yardımı ile gözlemlenen faz dağılımları, bitüm bağlayıcının polietilenler ile kolayca karışmadığını göstermiştir. Bitümlerin tekerlek izi davranışlarının uygunluğunu değerlendirmek amacıyla, literatürde bulunan çeşitli modeller kullanılarak sıfır kesme viskozitesi hesaplanmıştır.

Amin ve ark. (2016) yaptıkları araştırmada; belediye atıklarından oluşan plastik ve lastik kırıntısı modifiye katkı maddesi olarak kullanılarak saf bitümün performansını iyileştirme amaçlanmıştır. Bitümlerin performansını iyi aynalayabilmek için farklı sıcaklıklarda (düşük, orta ve yüksek) deneyler yapılmıştır. %5, %10 ve %15 oranlarında YYPE, AYPE ve LK katkılı bitümler, saf bitümle (PG 64–10) karıştırılmıştır. Katkılı ve saf bitümlerin tekerlek izi davranışını, düşük sıcaklıklardaki davranışını, yorulma ve viskozite değerini belirleyebilmek için DSR, RV ve BBR testleri gerçekleştirilmiştir. Bitümlerin viskoelastik özeliğinde ciddi iyileşmeler olduğundan dolayı, modifiye bitümlerin kalıcı deformasyon, yorulma direnci ve reolojik özelliklerinde son derece önemli iyileşmeler kaydedilmiştir.

Sadeque ve Patil (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AYPE, PP, LK ve nanokil atık malzemeleri kullanılarak Marshall stabilitesi üzerindeki etkilerini değerlendirilmiştir. Nanokil malzemesinden sırasıyla (%1, %2 ve %3) oranlarında ve polimerlerden sırasıyla (%2, %4 ve %6) oranlarında 60/70 penetrasyon derecesini sahip saf bitüme eklenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda Marshall stabilitesinde son derece önemli iyileşme kaydedilmiştir.

Tapkın (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; asfalt karışımın içerisine Polipropilen fiber katkısı katarak optimum bitüm içeriğinde numuneler üretilmiştir. Yapılan bu çalışmada katkılı numunelerin Marshall stabilite değerlerinin yükseldiği ve akma değerlerinin düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, katkılı numunelerin yorulma ömründe de ciddi artışlar görülmüştür. PP fiber katkısı ile üretilen bitümlü karışımların özelliklerini olumlu bir şekilde iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Habib ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; LDYPE, YYPE ve PP katkı maddeleri kullanılarak bitüm modifiye edilmiştir. Katkılı bitümlerin reolojik özellikleri ve saf bitüm (80 penetrasyonlu) ile etkileşimleri değerlendirilmiştir. Katkılı bitümler için yumuşama noktası, penetrasyon ve viskozite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda polimerlerin, bitümün penetrasyonu önemli etkiler gözlemlenmiştir. PP ile yapılan karışımlar diğer katkılara göre iyi bir karışım sunmakla birlikte ve bitümün viskozite değerini artırmıştır. %3 oranı altında polimer eklendiğinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Silva ve ark. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; bitüm modifiye katkısı olarak PET malzemesini %4, %5 ve %6 oranlarda bitümle karıştırılarak kullanmışlar. Bu çalışmanın sonucunda PET katkısının bitümün kıvamını arttırdığı ve elastikliğini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Ahmadinia ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, PET cinsinden üretilen atık plastik şişeleri kullanılarak Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımları yapılmıştır. PET katkılı modifiye edilmiş bitüm farklı oranlarda sırasıyla (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) karışımlar üretilmiştir ve hacimsel ve mekanik özelliklerini belirlemek için gerekli deneyler yapılmıştır. En uygun PET oranı olarak ağırlıkça %6 olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada, PET katkılı bitümün TMA'nın özelliklerini iyileştirmek ile karışımın sertliğini artırarak kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırmıştır. Ayrıca, PET katkılı

karışımların Marshall Stabilitesi, kütle özgül ağırlığı ve hava boşluğu gibi özellikleri üzerinde önemli etkiler gözlemlenmiştir.

Nouali ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, AYPE cinsinden atık naylon poşetleri kullanılarak 40/50 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı ile modifiye bitümler üretmiş ve daha sonra modifiye bitümler ile asfalt betonu karışımları hazırlamıştır. Yaptıkları çalışmada, tüm katkılı bitümlerde, saf bitüme kıyasla penetrasyon değerlerinin düştüğü ve yumuşama noktalarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Atık plastik katkılı karışımlar, saf bitüm ile üretilen karışımlara göre daha iyi işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirlik özellikleri sergilemiştir. Ayrıca katkılı karışımların daha iyi su direncini göstermek ile rijitlik modülünde de belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Gonzalez ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PE, PP, PS ve kullanılmış lastikten kauçuk (ELT) olmak üzere dört farklı plastik atığının kuru yöntemle asfalt betonu karışımlarına eklenerek etkileri araştırılmıştır. Saf ve her dört katkılı asfalt betonu karışımı ayrı ayrı analiz edilmiş ve karışımların deformasyona karşı direnç, işlenebilirlik, yorulma direnci ve rijitlik performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, atık plastiklerin özellikle PE, PP ve ELT'nin karışımın rijitliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Ancak karışımın yorulma direncine herhangi bir katkı etkisi olmamıştır. Katkıların karışımın işlenebilirliği üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ayrıca PE ve ELT'nin karışımın deformasyona karşı direncini artırdığı, PP'nin değiştiremediği ve PS'nin azaldığı görülmüştür.

Tiwari ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, AYPE ve YYPE atık plastiklerini kullanılarak karışımlar üretmiştir. Atık plastiklerin, bitümlü sıcak karışımların üzerinde etkilerini incelemek amacıyla çeşitli testler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, karışıma %8 oranında atık plastik (AYPE ve YYPE karışımından oluşan) eklenmesi ile karışımın stabilite değerleri önemli ölçüde artmış iken, karışımın boşluk oranı düşmüştür. Arica karışımın işlenebilirliği ve akma değerlerinde de artış gözlemlenmiştir.

Wahhab ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, geri dönüştürülmüş PP, YYPE ve AYPE plastikleri kullanılarak modifiye bitümlü bağlayıcılar üretilmiştir. Bu modifiye bitümler SBS ve PB katkı maddeleri ile birlikte kullanılarak dinamik depolama kararlılığı, birim deformasyon eğilimi, geri çekme eğilimi ve yüksek sıcaklık performansı incelenmiştir. Yüksek sıcaklık performansında iyileşmeler

gözlemlenmiştir. Geri dönüştürülmüş atık plastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar, yeterli geri kazanım yeteneğine sahip olmasalar da, AYPE ve YYPE, aynı miktarda SBS tek başına kullanıldığında elde edilenden daha yüksek bir geri kazanım ve birim deformasyon direnci elde etmek için SBS ile birlikte kullanılabilir. PP içeriği %2'nin üzerindeyse, modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının dengesiz olduğu gözlemlenmiştir. YYPE oranı %4'ün altında ve AYPE oranı %6'nın altında, SBS veya PB içeriyor olmalarına bakılmaksızın hem zaman içinde bozulma hem de ayrışma açısından iyi bir depolama kararlılığı sergilemiştir.

Appiah ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, YYPE ve PP cinsinden atık plastikleri bitümlü bağlayıcı ile 160-170 sıcaklığında karıştırarak modifiye bitümler üretmiştir. Katkılı bitümler için yumuşama noktası, penetrasyon ve viskozite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm katkıli bitümlerde, katkı oranı artıkça penetrasyon değerleri azalmıştır ve yumuşama noktası genellikle artmıştır. YYPE için en uyumlu karışım %2 ve en uyumsuz karışım %3 olarak gözlemlenmiştir. En gelişmiş ve homojen karışım, %3 PP eklenmesi ile elde edilmiştir.

Şanlıer (2018), Kuzey Marmara Otoyolu Projesi kapsamında yürütülen çalışmasında, Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarının maliyet analizini gerçekleştirerek performanslarını geleneksel asfalt ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, %4,5 oranında SBS saf bitüme (50/70) ekleyerek modifiye bitüm üretilmiştir. TMA kaplamalarının ilk maliyetinin geleneksel asfalta kıyasla daha yüksek olmasına rağmen, uzun ömürlü olması ve az bakım-onarım gerektirmesi nedeniyle geleneksel asfalt kaplamalardan daha ekonomik olduğu belirtilmiştir.

Fransesqui ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geri dönüştürülmüş PET plastik atıklarının oldukça vezikülasyonlu artık agregalarla birlikte kullanılmasının bitümlü karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, kısmen agreganın yerine geçen atık plastik (PET), artık agregalar ve farklı bağlayıcılar birleştirilerek bitümlü karışımların mekanik ve fiziksel özellikleri ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, atık plastik PET %1 oranına kadar gözenekli agregalar ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca PET kullanımı su hasarına ve tekerlek izine karşı karışımın direncini arttırdığını göstermiştir.

Moubark ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, polipropilen (PP) plastik kullanılarak bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkiler

araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, 60/70 penetrasyonlu bitüme %5 ve %7 oranlarında PP eklenerek bir saat boyunca 170°C sıcaklıkta karıştırılarak modifiye bitümler üretilmiş ve daha sonra bu bitümlerle karışımlar hazırlanmıştır. Bitümlü sıcak karışımlar için Marshall stabilite ve dolaylı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, katkılı karışımların Marshall stabilite değerleri, katkısız karışımlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, %5 PP içeren karışımların Marshall stabilite değerleri, %7 PP içerenlere göre daha yüksek çıkarken, akma değerleri daha düşük çıkmıştır.

Ma ve ark. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, en yaygın atık plastik çeşitleri olan PET, YYPE, AYPE, PP, PS, EVA ve PVC ıslak ve kuru yöntemler ile bitümlü karışımlarda kullanımı ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, atık plastiklerin bitümlü karışımlara eklenmesi, tekerlek izine, yorulmaya ve neme karşı karışımın direncinde iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak plastik modifiyeli bitümlü bağlayıcı uygulamasında düşük sıcaklık performansı sorunu devam etmiştir.

Abdullah ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli atık plastiklerin bitümün reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, 60/70 penetrasyonlu bitüme farklı oranlarda atık plastikler sırasıyla bitümün ağırlığına göre (%1.5, %3, %4.5 ve %6) eklenmiş ve bir saat boyunca 170°C - 175°C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Bitümün reolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve DSR testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, plastik atık oranı arttıkça bitümün penetrasyon değeri düşerken, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Plastik atık eklenen bitüm, kaplamanın tekerlek izine karşı direncini artırarak performansını geliştirmiştir. Ayrıca, %6 atık plastik oranı çalışmada optimum oran olarak belirlenmiştir.

El-Naga ve Ragab (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PET plastiğin kullanımının bitümlü bağlayıcı ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini değerlendirmek için penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri gerçekleştirilmiş, aynı zamanda bitümlü karışımların performansını değerlendirmek amacıyla Marshall stabilite, tekerlek izi ve dolaylı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, katkılı bitümün penetrasyon değeri katkısız bitüme göre azalmış, yumuşama noktası ve viskozite değerleri ise

artmıştır. Ayrıca, PET'in karışıma eklenmesiyle, karışımın Marshall stabilite değerleri ve tekerlek izi direncinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. %12 PET oranının karışım için en iyi performans oranı olarak belirlenmiştir. %12 PET eklenmesiyle, kaplamanın hizmet ömründe %2,81 artış ve kaplamanın kalınlığında %20 tasarruf elde edilmiştir.

Gudimetta ve ark. (2003), beton için kullanılan iki nokta işlenebilirlik deney cihazında bazı değişiklikler yaparak, bu yöntemi bitümlü sıcak karışımlar için uyarlamışlardır. Daha sonra bitümlü sıcak karışımlara yapılan işlenebilirlik deneylerinde, agrega tipinin karışımın işlenebilirliği üzerinde son derece önemli bir etkiye sahip olduğunun sonucuna varmıştır. Kübik köşeli granit agregası kullanılarak üretilen karışımlar, yarı köşeli kırılmış dere agregası ile üretilen karışımlara göre daha düşük işlenebilir oldukları gözlemlenmiştir. Nominal maksimum agrega boyutu belli bir agrega tipi, tane dağılımı ve bağlayıcı tipi yükseldikçe, işlenebilirlik azalmaktadır. Ayrıca, tane dağılım şeklinin işlenebilirlik üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bitüm bağlayıcı türünün işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıcaklık artış ile karışımın işlenebilirliği de artmaktadır.

Siswosoebrotho ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada, bitümlü sıcak karışımlarda yassı agrega oranının işlenebilirlik üzerinde etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada %5 ile %45 arasında, yassı agrega kullanılarak beş farklı karışım hazırlanmıştır ve üretilen karışımların optimum bitüm oranı hesaplanmıştır. Karışımlarda, yassı agrega oranı yükseldikçe optimum bitüm oranının arttığı gözlemlenmiştir. Gyrator sıkıştırma makinesinde hazırlanan karışımların sıkıştırma grafiğinden WI (İşlenebilirlik indeksi) değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, optimum bitüm içeriğinde sıkıştırılan karışımların yassı agrega miktarının yükselmesi ile işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir.

Cabrera (1991) yaptığı bir çalışma, bitümlü karışımların işlenebilirliğini belirlemek için Leeds Üniversitesi Gyrator sıkıştırma makinesini kullanılmıştır. Bu çalışmada numuneler 0,7MPa eksenel bir yük altında 30 devirde sıkıştırılmıştır. Her 5 devirden sonra numune yükseklikleri ölçülmüştür. Daha sonra numune kalıptan çıkartıldıktan ve soğutulduktan sonra ağırlığı tartılmıştır. Numunelerin ağırlık ve yükseklik bilgileri kullanılarak porozite değerleri hesaplanmıştır ve daha sonra elde edilen porozite değerlerine göre, porozite değeri (Pi) ve devir sayısı (i) grafiği çizilmiştir. Bu grafikte devir sayısını temsil eden eksen logaritmik bir eksenidir. Yapılan çalışmada

$P_i = A - b[\log(i)]$ şeklinde doğrusal bir denklem saptanmıştır. Bu denklemde P_i : (i) noktasındaki porozite temsil ederken, A,b denklemdeki sabitleri ifade etmektedir. A sabitinin tersi işlenebilirlik indeksi olarak tanımlanmaktadır. İşlenebilirlik indeksi artıkça, karışımın daha sıkılaşabildiğini göstermektedir. İşlenebilirlik indeksi ve bitüm oranının grafiği çizildiği zaman düz bir doğru elde edilmiştir. Bitüm oranı belli bir agregata tane dağılım için değiştirildiği zaman sıkışma eğrisinin konumu düşey yönde değişmiştir ancak eğimi aynı kalmıştır. Yapılan arazi çalışmalarına göre, işlenebilirlik indeksi 6'den küçük olduğu zaman, karışımların sıkıştırılması sırasında zorluklar ile karşılaşmıştır.



4. ÇALIŞMA KAPSAMINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ VE AGREGA - BİTÜM DENEYLERİ

Bu bölüm, iki alt bölümden oluşmaktadır. İlk alt bölümde, çalışmada kullanılan agrega, filler, bitüm, atık plastik ve diğer malzemeler hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir. İkinci bölümde ise agrega ve bitümün özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

4.1. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri

4.1.1. Agregas

Agrega yol yapımında kullanılan ana malzemedir. Bitümlü sıcak karışımları içerisindeki agrega miktarı ağırlıkça (%90-%95), hacimce yüzde (%75-%85) arındadır. Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar, karayolu teknik şartnamesinin standartlarına uygun olmakla birlikte tane dağılım sınırların şartlarını sağlaması gerekmektedir. Agregas taşıyıcı bir iskelet oluşturarak yola etkileyen yüklerden meydana gelen gerilmeleri karşılamakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu açıdan üstyapıda kullanılacak agreganın özelliklerini bilmek yol mühendisleri için, projelendirme aşamasında oldukça önemlidir. Agreganın şekli, yüzey pürüzlülüğü, tane dağılımı, yassılık durumu gibi özellikleri BSK'lerin işlenebilirliği yanında tekerlek izi ve yorulma bakımından performansları üzerinde de büyük bir önem arz etmektedir. Etki eden yüklerin etkisi altında kaplama tabakası çeşitli deformasyonlara maruz kalabilmektedir. Kaplamanın yapımı sırasında kullanılan malzemeler, yapımı için kullanılan yöntemler ve yapımından sonra dış yükler etkisi altında kalmak kaplamanın performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Bir kaplama tabakasının yoğunluğu ve direnci en çok agrega özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda agregaların dayanıklı, sert, zararlı ve yabancı maddelerden temizlenmiş olması, aynı zamanda yüzey şekillerinin birleşerek direnci artırıcı bir kenetlenme yapması hedeflenmektedir (Anonymous 2002).

Agregalar boyutları bakımından üç farklı grupta incelenmektedir.

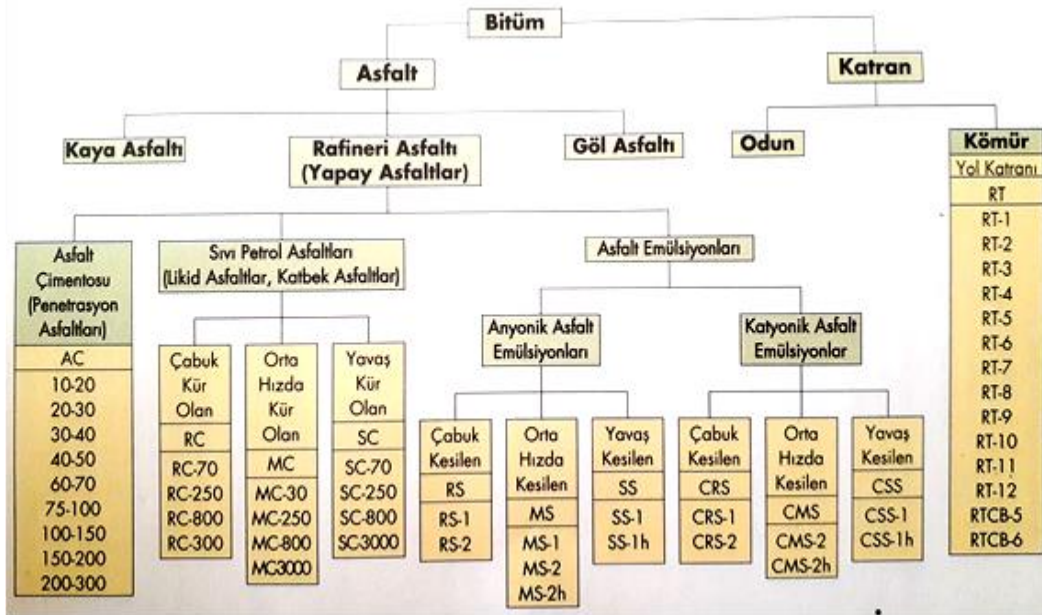
- Kaba agrega; 4 numaralı elek (4,75 mm) üstünde kalan malzeme miktarıdır.
- İnce agrega; 4 numaralı elek ve 200 numaralı elek (0,075 mm) arasında kalan malzeme miktarıdır.
- Mineral filler; 200 numaralı elekten geçebilen malzeme miktarıdır

Agreganın amaçlanan görevleri yerine getirebilmesi için, uygun özelliklere sahip olması, agreganın seçimi açısından en kritik faktördür. Agregaların üretim ve yapım aşamalarında yapılan kalite kontrol işlemleri titizlikle gerçekleştirilmektedir. Böylece hizmet ömrü boyunca stabil, güvenli, ekonomik, kaplamalar inşa edilir. Kaplamanın fonksiyonel ve yapısal gereksinimlerini karşılabilmesi için, agregaların aşağıdaki özellikleri sahip olması gerekmektedir.

- Hava şartlarının ve kimyasal etkilerin aşındırıcı etkilerine karşı direnç göstermelidir,
- Statik ve dinamik yüklerin etkisi altında kırılmaya karşı direnç göstermelidir,
- İç gerilmelere (ıslanma–kuruma, genleşme–büzülme, donma–çözülme vb.) karşı direnç göstermelidir,
- Bağlayıcı ile güçlü bir adezyon sergilenmelidir,
- Yüzey tabakalarında kullanıldığı takdirde; sürtünme ve kayma direnci, pürüzlülük, tekerlek aşındırması, görünüm ve ışık yansıtması, gürültü gibi yüzey özelliklerini sağlaması gerekmektedir (Tunç, 2004).

4.1.2. Bitümlü bağlayıcı

Bitüm, genellikle doğal kökenli hidrokarbonlar ile pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle oluşan) hidrokarbonların karışımı veya bu ikisinin birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Bitüm, çoğunlukla sıvı, gaz, katı ya da yarı katı halde olabilir ve metal dışı türevleriyle birlikte bulunmaktadır. Bitüm, yapıştırıcı bir özelliği sahip olmakla birlikte karbondisülfürde tamamen çözülebilir. Bitümlü bağlayıcılar, asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Asfalt, doğal olarak bulunan ya da ham petrolün işlenmesi ile elde edilen, koyu kahverengi ile siyah arası değişen renkte, sıvı, katı veya yarı katı halde bulunabilen ve güçlü bağlayıcı özelliklere sahip olan hidrokarbonlardan oluşan bir malzemedir. Bitümlü bağlayıcılar, kıvamlılığı ifade eden ve 25°C'de belirlenen penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar, bu değerler genellikle 10 ile 300 arasında değişmektedir. Penetrasyon derecesi artıka, bitümlü bağlayıcı daha yumuşak bir hale gelir ve bundan dolayı bağlayıcılık gücü azalmaktadır. B160/220 yumuşak bir bitümlü bağlayıcıyı ifade ederken, B10/20 sert bir bitüm bağlayıcıyı ifade etmektedir. Yol üst yapısında kullanılan bitümlü malzemelerin sınıflandırması Şekil 4.1'de görülmektedir (İlcalı ve ark., 2001; Akmaz, 2020).



Şekil 4.1. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması (İlcalı ve ark., 2001)

Gün geçtikçe yollar üzerinde artan toplam dingil yükleri ve daha yüksek performans talepleri, bir üstyapının uzun vadeli davranışının tahminini zorunlu kılmaktadır. Bir üstyapının inşasında kullanılan malzemelerin kalitesi, tasarım, uygulama ve birçok diğer faktörler, üstyapının performansını doğrudan etkilemektedir. Bitümlü bağlayıcı, karışım içinde hacim açısından küçük bir alan kaplamasına rağmen, dayanıklılık kazandırması yanı sıra karışıma viskoelastik özellikler kazandırma nedeniyle karışımlarda önemli bir rol oynamaktadır (Whiteoak, 2004).

4.1.3. Plastikler

İkinci bölümde plastik türleri ve plastik sektörü hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise, çalışma kapsamında kullanılan YYPE, AYPE, PET ve PP plastik türleri ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1.3.1. YYPE

Düşük basınçta etilen monomerlerinden elde edilen bir polietilen türü olan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE), kimyasal maddelere ve suya karşı iyi bir dayanıklılığa sahiptir; ancak ışık ve açık hava koşullarına karşı direnci sınırlıdır. Ayrıca, nitrik aside (HNO_3) karşı dayanıksız bir özelliğe sahiptir. Yoğunluk oranı $0,936-0,960 \text{ gr / cm}^3$ arasında değişen Yüksek Yoğunluklu Polietilen'in (YYPE) erime akış hızı $0,02 - 20$ arasında bulunurken, erime sıcaklığı $125^\circ\text{C}-135^\circ\text{C}$ arasında bulunmaktadır. Geniş çaplarda temin edilebilen (YYPE) kaynaklama yöntemi ile kolayca birleştirilebilme özelliğine sahiptir. Dolayısıyla su tankı yapımı için ve atık su artıma sistemlerinde

rahatlıkla kullanılabilir. YYPE'nin molekülleri düşük bir hacimde toplanabildiğinden dolayı sertlik ve yoğunluk açısından yüksek bir değere sahiptir. Bu plastik türü genellikle gaz borusu, sulama borusu, motor yağı kapları, mutfak eşyaları, deterjan şişeleri, plastik poşet, hışır poşet, atlet tipi poşet, bidon, kavanoz, şişe, oyuncuklar, kasalar ve kapaklar gibi çeşitli alanlarda ve sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (URL 6; URL 7; Arıkan, 2007).



Şekil 4.2. YYPE bidonlar (URL 8)

4.1.3.2. AYPE

Etilen monomerlerinden yüksek basınçta üretilen bir PE türüdür. Alçak yoğunluklu polietilen üstün gerilme ve üstün yırtılma direnç özelliğine sahiptir. Darbeye karşı dayanıklılığı son derece yüksektir. Yoğunluk oranı $0,936-0,960 \text{ gr / cm}^3$ arasında olan Alçak Yoğunluklu Polietilen (YYPE)'nin erime akış hızı $0,2-50$ arasında iken, erime sıcaklığı $100^{\circ}\text{C}-120^{\circ}\text{C}$ arasındadır. AYPE kolayca renklendirilebilir, YYPE'e göre daha hafif ve kolayca geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Özellikleri bakımından geniş bir kullanım alanı vardır. Genelde tarım, mağaza ve market poşeti, balonlu naylon, strech, kenetleme kapakları, oyuncaklar, filmler ve mutfak eşyaları olarak kullanılmaktadır (URL 6; URL 7; Arıkan, 2007).



Şekil 4.3. AYPE torbalar (URL 9)

4.1.3.3. Polietilen Teraftalat (PET)

J. Rex Whinfield ve James T. Dickson tarafından ilk olarak 1940 yılında tanıtılmıştır. PETE veya PET, en yaygın kullanılan plastik türlerinden biridir. Tanıtıldıktan 30 yıl sonra, Coca-Cola ve Pepsi markaları tarafından şeffaf içecek şişelerinde kullanılmaya başlanmıştır (URL 7).

Etilen glikol ile tereftalik asitin polimerizasyon yöntemi ile üretilen polietilen teraftalat, diğer termoplastiklere göre daha dayanıklı, sert, parlak ve dağılmaya karşı dayanıklıdır. İçecek, yiyecek, meşrubat ve sentetik fiber gibi birçok temel alanda kullanılabilen polietilen teraftalat, nem ve gaz geçişine dayanıklı olduğu için düşük alkollü ve gazlı içeceklerin şişelerinde kullanılmaktadır (URL 6).



Şekil 4.4. Polietilen Teraftalat şişeleri (URL 6)

4.1.3.4. Polipropilen (PP)

Dünyadaki en yaygın kullanılan ikinci plastik hammaddesi polipropilen, ilk olarak 1957 yılında kullanılmıştır. Otomotiv sanayisinde kullanılan parçalardan tekstil ve gıda paketlemesine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan termoplastik bir polimerdir. Çözücü ve kimyasal maddelere karşı dirençli olması, düşük sürtünme katsayısına sahip olması, ayrıca nem ve ısıya karşı yüksek dayanıklılığa sahip olması gibi özellikleri, kullanıcılar için önemli avantajlar sunmaktadır. Polipropilen düşük bir yoğunluğa sahip olduğu için diğer polimerlere göre daha ucuzdur. Bu nedenle ekonomik açıdan üstünlük sağladığı için pazarda en fazla tercih edilen plastik türüdür. Propilen monomerinin polimerizasyonu sonucu üretilen polipropilen, kimyasal asitlere ve bazlara karşı yüksek dirence sahiptir. Erime sıcaklığı 130°C-171°C arasında olan Polipropilen, yoğurulmaya karşı oldukça dirençlidir. Polipropilen, sürtünme katsayısı düşük, darbeye karşı çok dayanıklı ve oldukça iyi bir elektrik yalıtkanıdır. Polipropilen çeşitli avantajlar ve kolaylıklar sağladığından genellikle banyo gereçleri, ambalajlama, kovalar, mutfak eşyaları, bahçe sandalyeleri ve masaları, gıda paketleme, endüstriyel alanlarda, bidonlar ve deterjan şişeleri yapımında yaygın olarak kullanılır (URL 6; Küçükkaya, 2018).



Şekil 4.5. Polipropilen (URL 6)

4.1.4. SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) veya Kraton

Gün geçtikçe artan araç sayısı ve trafik yükleri kaplamalarda çeşitli bozulmalara yol açmaktadır. Meydana gelen bu bozulmaları en aza indirmek ve uzun ömürlü kaplamalar inşa edebilmek amacıyla karışımlarda modifiye katkıları kullanılır. Yol üstyapı kaplamaların yapımında günümüzde yaygın olarak kullanılan Stiren-Bütadien-Stiren (SBS), değişik polimer modifiye edici katkı maddeleri kullanılır. SBS katkı malzemesini homojen bir şekilde bitüm ile karıştırılabilmek amacıyla, yüksek devirli öğütücü (high shear mixer) tesise ihtiyaç duyulmaktadır. SBS bitüm ile uygun bir şekilde karışması için 180°C-190°C arası bir sıcaklıkta modifiye işlemi gerçekleştirilir. Uygun bir modifiye bitümü elde edebilmek amacıyla SBS bitüm ağırlığına göre %4-5 arasında eklenmektedir. Şekil 4.6'da SBS ve Çizelge 4.1'de SBS'nin teknik özellikleri gösterilmiştir (Şanlıer, 2018; Arslan, 2014).



Şekil 4.6. SBS veya Kraton

Çizelge 4.1. SBS Teknik özellikleri

SBS Teknik Özellikleri	
Özgül ağırlığı (gr/cm ³)	0,94
Kütle ağırlığı (ton/m ³)	0,40
Çekme gerilmesi (MPa)	33
Kopma uzaması (%)	1000
Sertlik, Shore A (15 sec)	70
Erime Akış Hızı (g/10 min)	< 1

4.1.5. Selülozik elyaf

Sadece TMA'da kullanılan bir malzeme olan selülozik elyaf (Viatop), fazla bitüm içeren TMA karışımlarında bitümün akmasını önlemek ve agregalar arasındaki bağları güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Karayolu teknik şartnamesine göre, bir karışımda kullanılan elyaf miktarı karışımın ağırlığının %0,3-1 arısında olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan VİATOP selülozik elyaf Teknomet tarafından temin edilmiştir.



Şekil 4.7.Viatop

Selülozik VIATOP, karışıma eklenerek kaplamanın stabilitesini artırır. Bu tip yol kaplamalarında, yoğun trafik yükleri altında bile deformasyona karşı sağlam direnç ve uzun ömürlü kaplamalar elde edilir. Bu uygulama özellikle TMA'da yaygındır. Normal yol kaplamalara göre Avrupa'da son 25 yıl içerisinde en çok tercih edilen yol kaplamaları, VIATOP kullanılarak üretilen TMA kaplaması olmuştur. Ayrıca Viatop, bitüm içindeki liflerin ayrışıp dağılmasını kolaylaştıracak bir özelliğe sahip. Selülozik elyaf VIATOP kullanılarak yapılan yol kaplamalarında, ses azaltan asfalt, sessiz asfalt, ince tabaka asfalt ya da binder tabakası kalitesinde önemli derecede ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu sayede yol inşasında daha ekonomik çözümlere ulaşılmıştır (URL 10, 2013).

Bitümlü karışımlarda elyaflar Karayolu Teknik Şartnamesine göre uygun bir şekilde kullanılmalıdır. KTŞ şartnamesine göre elyafların özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. KTŞ'ye göre elyaf özellikleri

Elyaf uzunluğu(maksimum)	6 mm
No 20 (0.850 mm) elekten geçen	%85±%10
No 40 (0.425 mm) elekten geçen	%65±%10
No 100 (0.149 mm) elekten geçen	%30±%10
Kül Muhtevası	%18±%5
pH	%7,5±%1
Yağ absorpsiyonu	Elyaf ağırlığının 5±1 katı
Nem absorpsiyonu	(Ağırlıkça)< %5

4.2. Agrega – Bitüm Deneyleri

Bu bölümde ise tez çalışması doğrultusunda uygulanan agregaya ve bitüm deneylerinin yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.2.1. Agrega deneyleri

Bu kısımda ise agregaların teknik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerin yöntemleri anlatılmıştır.

4.2.1.1. Elek analizi deneyi (TS EN 933-1)

Elek analizi deneyi, agregaya yığılı dane boyutu dağılımını belirlemek için gerçekleştirilmektedir. Deney sonucu, gradasyon sınıflandırmasında, gradasyonun şartnameye uygunluğunu kontrol etmede ve agregaya karışım oranlarını hesaplamasında kullanılmaktadır. Bir karışımda kullanılan agregaların dane boyutu dağılımını belirlemek için, Çizelge 4.3'te özellikleri verilen kare delikli elekler kullanılır.

Agrega numunelerinin tane dağılımını ifade etmek için kullanılan terim granülometri, bu dağılımı göstermek için çizilen eğriye ise granülometri eğrisi ismi verilmektedir (Altan, 2018; ESOGÜ, 2020).

Çizelge 4.3 Elek açıklıkları ve numune ağırlıkları

Elek Açıklıkları		Deney Numunesi Ağırlığı
mm	İnç	Minimum (Kg)
37.5	1 1/2	15
25.0	1	10
19.1	¾	5
12.7	½	2
9.52	3/8	1
4.75	No.4	0.50
2.00	No.10	
0.42	No.40	
0.177	No.80	
0.075	No.200	

- Agregaya numunesi iyi bir şekilde karıştırarak homojen bir hale getirildiği zaman maksimum tane boyutuna göre Çizelge 4.3'te belirtildiği gibi uygun agregaya miktarı çeyrekleme ya da bölgeç metodu ile alınır. Alınan agregaya numunesi $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklıkta etüvde veya havada kurutulmaya bırakılır. Kurutulan agregaya numunesi soğuduktan sonra tartılarak kütlesi kaydedilir.
- Kurutulmuş numune tartıldıktan sonra 200 numaralı (0.075mm) elek üstünde yıkama işlemi, su berraklaşınca kadar devam ettirilir.

- Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra, agrega numunesi etüvde $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklıkta kurutulmaya bırakılır. Kurutulan numune tartılır ve kütlesi kaydedilir.
- Tartma işleminden sonra agregalar elek takımına dökülüp 100% geçen elekten başlayarak her eleğe ayrı ayrı eleme işlemi yapılır. Eğer agrega miktarı 20 kg'dan fazlaysa, mekanik elek sarsıcılar kullanılması tavsiye edilir. Deneyde kullanılan agrega takımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.
- Eleme işlemi tamamlandıktan sonra her elek üzerinde kalan numune miktarı tartılır ardından elek analizi tablosuna kaydedilerek kümülatif ağırlıklar hesaplanır.
- Elekler üzerinde kalan agrega miktarı yüzde cinsinden hesaplanır. Buna bağlı olarak geçen yüzde de hesaplanarak elek analizi tablosuna aktarılır.
- En sonunda granülometri eğrisi çizilir. Şartname sınırları içerisinde ise işlem tamamlanır.



Şekil 4.8. Elek takımı

4.2.1.2. Los Angeles aşınma deneyi (TS EN 1097-2)

Üstyapı kaplamaların yapımında kullanılan agregalar sıkıştırma işlemi sırasında ve trafik yüklerin etkisi altında kırılmaya ve aşınmaya karşı direnç göstermelidir. İri agregaların parçalanma ve aşınmaya karşı direncini tespit etmek için Los Angeles aşınma

deneyi uygulanmaktadır. Bu deney, 14 mm elekten geçebilen ve 10 mm eleğin üstünde kalan agrega numunelerine uygulanmaktadır. Şekil 4.9’da Los Angeles deney cihazı gösterilmiştir. Cihaz, silindir şeklindeki boş bir tamburdan meydana gelmektedir. Cihazın iki ucu kapalı olup iki paralel destekle etrafında rahatlıkla dönebilmektedir. Tamburun iç uzunluğu (508 ± 5) mm iç çapı ise (711 ± 5) mm’dir. Deneye tabi tutulan numunenin aşındırma yükü, yani kullanılması gereken çelik bilye sayısı aşağıdaki gibidir. Cihazın iç yüzeyinin silindirik kalmasını sağlamak amacıyla seyyar bir kapak kullanılarak ve delikler toz sızdırmasın diye iyice kapatılmalıdır. Deneyde agrega aralık sınıfına göre bilye sayısı Çizelge 4.4’te verildiği gibi seçilir. Her bir küresel bilye 45mm ile 49 mm arasında çap, 400 g ile 445 g arsında kütleyle sahiptir (TS EN 1097-2, 2000; ESOGÜ, 2020).

Çizelge 4.4. Aralık sınıflara göre bilye sayısı

Aralık Sınıfları (mm)	Bilyelerin Sayısı	Bilye yükü katsayısı
4-8	8	3410-3540
6.3-10	9	3840-3980
8-12	10	4260-4420
11,2-16,0	11	5120-5300

Deneyin Yapılışı: Numuneyi cihazın içine koymadan tamburun temiz olup olmadığına dikkat edilmeli (TS EN 1097-2, 2000; ESOGÜ, 2020).

- Deney için agrega çap aralığına uygun 5000gr malzeme tartılıp iyice yıkanır.
- Yıkanmış numune 24 saat 110°C sıcaklıkta etüvde kurutulmaya bırakılır.
- Kurutulmuş numune bilyeler ile tamburanın içine yerleştirilir.
- Tamburanın kapağı deliklerden toz sızdırmayacak şekilde iyice kapatılır ve dakikada 31-33 arasında sabit bir hızla 500 devir döndürülür.
- Deney bittiğinde aşınmış numune 1,6mm elekten elenir ve elek üzerinde kalan agrega miktarı tartılır ve aşağıda verilen bağlantı yardımı ile Los Angeles katsayısı hesaplanır.

$$\text{Los Angeles Katsayısı (\%)} = \frac{5000-m}{5000} \quad (4.1)$$

m: 1,6mm elek üzerinde kalan agrega miktarıdır.



Şekil 4.9. Los Angeles aşınma deney cihazı

4.2.1.3. İri agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi

Özgül ağırlık belirli hacimdeki numune ağırlığının aynı hacimdeki $+4^{\circ}\text{C}$ 'deki suyun ağırlığına oranıdır. Bu deney hedefi bitümlü karışımlardaki boşluk yüzdesini hesaplamak ve agregaların hacim, ağırlık ilişkisini saptamaktır (İlcalı ve ark., 2001; ESOGÜ, 2020; İzol, 2020).

Deneyin Yapılışı:

- 4,75mm eleğın üstünde kalan agregadan 2kg ağırlığında numune, agrega tane dağılımını temsil edecek bir şekilde tartılır.
- Numuneler tartıldıktan sonra iyice yıkanır ve agregaların üzerini aşacak şekilde su eklenerek numune suyun içinde 24 saat boyunca bekletilir.
- Numuneler 24 saat sonra sudan çıkartılır ve bir havlu yardımıyla yüzey kuru ancak suya doymun bir hale getirilecek şekilde kurutulup tartılır. Bu şekilde agreganın yüzey kuru, suya doymun agrega ağırlığı (B) elde edilir.
- Sonrasında numuneler tel sepet içine yerleştirilerek su dolu kovaya daldırılır ve agrega numunelerin üzerinden su seviyesi 5cm geçecek şekilde Arşimet terazisi (Şekil 4.10) yardımıyla sudaki ağırlığı (C) tespit edilir.

- Tel sepet birkaç kez iyice sarsılır ve böylece agrega taneleri arasındaki hava boşlukları kalmaz
- Daha sonra su içerisindeki numune bir tepsiye boşaltılarak etüvde 110°C bir sıcaklıkta 24 saat kurutulmaya bırakılır.
- En sonunda kurutulmuş numune oda sıcaklığında soğutmaya bırakılır ve kuru agrega ağırlığı (A) tartılır.
- İri agreganın özgül ağırlık ve su emme oranları aşağıda verilen bağlantılar yardımı ile hesaplanır.

$$\text{Kaba agrega hacim özgül ağırlığı (g/cm}^3\text{)} = \frac{A}{B-C} \quad (4.2)$$

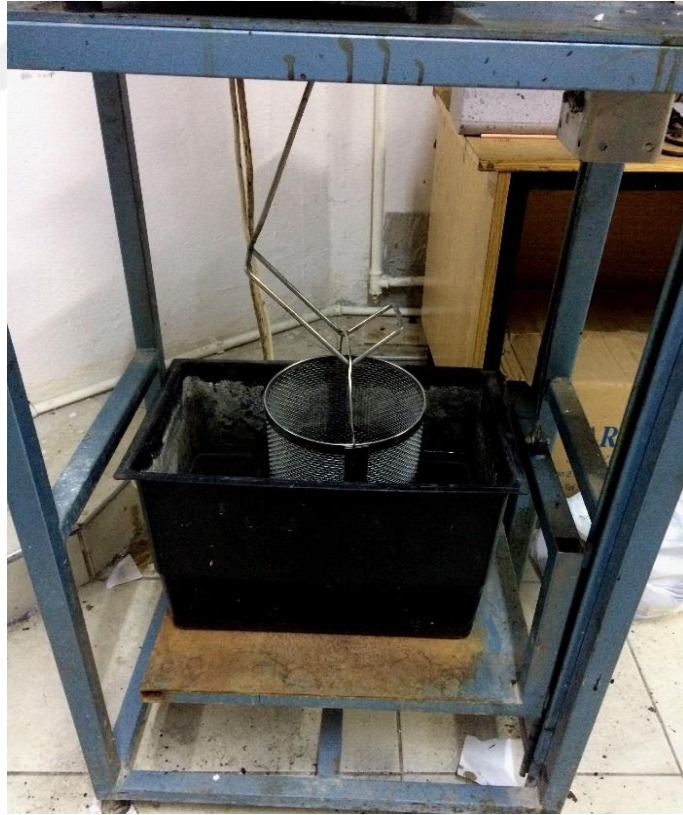
$$\text{Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{A}{A-B} \quad (4.3)$$

$$\text{Kaba agrega su emme oranı (\%)} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (4.4)$$

A: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi, (g).

B: Doygun-yüzey kuru numune kütlesi, (g).

C: Doygun-yüzey kuru numunenin sudaki görünür kütlesi, (g).



Şekil 4.10.Arşimet terazisi

4.2.1.4. İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi

Bu deney, 0.075 eleğin üzerinde kalan ve 4.75 mm eleği geçebilen agregaların özgül ağırlıklarını ve su emme oranlarını belirlemek için yapılmaktadır. İnce agregalar tartımı için piknometre kullanılır (ESOGÜ, 2020; Ilıcalı ve ark., 2001; TS 1097-2, 1998).

Deneyin yapılışı:

- 4,75mm-0.075mm elekler arasında kalan agregadan 1kg ağırlığında numune, agrega tane dağılımını temsil edecek bir şekilde tartılır.
- Tartılan numuneler tepside üzerini su geçecek şekilde 24 saat boyunca bekletilir.
- Sonrasında agregalar, numune kaybı olmayacak bir biçimde suyu süzülür daha sonra sıcak hava akımı yardımı ile yüzey kuru ancak suya doymuş bir hale getirilecek şekilde kurutulur. Agreganın yüzey kuru suya doymuş ağırlığını elde edebilmek için tartılır.
- Numunenin yüzey kuru suya doymuş halde olup olmadığını kontrol etmek için Abraham hunisi ile kontrol sağlanır.
- Ardından piknometrenin boş ağırlığı tartılır (A) ve 500g agrega numunesi alınarak piknometreye yerleştirilir. Böylece piknometre ve yüzey kuru suya doymuş numunenin tartma işlemi gerçekleşir (C).
- Sonrasında hazırlanan numune üzerine su ilave edilir ve boşluk kalmaması için piknometre iyice birkaç kez sarsılır.
- Ardından Piknometre 25 °C su banyosuna konular ve Piknometre içindeki malzeme 25 °C bir sıcaklığa ulaştığında su banyosundan çıkarılır. Sonrasında bir havlu yardımı ile iyice kurutularak tartma işlemi yapılır (D).
- Aşağıdaki bağlantılar vasıtasıyla ince agreganın özgül ağırlıklarını ve su emme oranları belirlenir.

$$\text{İnce agreganın hacim özgül ağırlığı} = \frac{E}{(B-A) - (D-C)} \quad (4.5)$$

$$\text{İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı} = \frac{E}{B+E-D} \quad (4.6)$$

$$\text{İnce agreganın su emme oranı (\%)} = \frac{C-A-E}{E} \quad (4.7)$$

A= Piknometre ağırlığı (g)

B= Piknometre + Suyun ağırlığı (g)

C= Piknometre + Yüzey kuru ve suya doymuş olan numune ağırlığı (g)

D= Piknometre + Yüzey kuru ve suya doymuş olan numune + suyun ağırlığı (g)

E= Kuru numunenin ağırlığı (g)



Şekil 4.11. Abraham hunisi (Sultani, 2021)

4.2.1.5. Mineral filler özgül ağırlık deneyi

Bu deney, 200 numaralı (0.075 mm) elekten geçebilen filler malzemesinin özgül ağırlığını belirlemek amacı ile gerçekleştirilmektedir. Filler malzemesinin sadece zahiri veya başka bir deyişle görünen özgül ağırlığı belirlenir. Zahiri özgül ağırlık; belli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır (TS 1097-2, 1998; ESOGÜ, 2020)

Deneyin Yapılış:

- Boş piknometre şişesi tartılır (A)
- Daha sonra piknometre iyice su ile doldurulur ve 1 saat boyunca $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklığı sahip su banyosunda bekletilir. Sonra piknometre su banyosundan çıkarılıp iyice kuruttuktan sonra tartılır (B).
- Daha sonra filler malzemesi, $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklıkta 4 saat boyunca etüvde kurutulmaya bırakılır. Etüvden çıkartılan filler malzemesi oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılır. Sonra soğumuş filler malzemesi, bir huni kullanılarak, temizlenmiş ve kurutulmuş bir piknometre şişesine üçte bir oranında doldurulur ve şişenin ağzı kapatılarak tartım işlemi yapılır (C).

- Ardından piknometre şişesi ağzına kadar su ile dolacak bir biçimde doldurulur ve bir saat boyunca $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklığı sahip su banyosunda bırakılır. Daha sonra su banyosundan çıkartılan piknometre kurutulup tartım işlemi yapılır (D).
- En sonunda 3.8 bağlantı yardımı ile filler malzemesinin özgül ağırlığı belirlenir.

$$\text{Mineral Fillerin Zahiri Özgül Ağırlığı} = \frac{C-A}{(B-A) - (D-C)} \quad (4.8)$$

A: Piknometre ağırlığı, (g).

B: 25°C 'deki su dolu piknometre ağırlığı, (g).

C: Piknometre ve kuru numune ağırlığı, (g).

D: 25°C sıcaklıktaki numune ve su dolu piknometre ağırlığı, (g).



Şekil 4.12. Piknometre şişesi (Sultani, 2021)

4.2.2. Bitüm bağlayıcı deneyleri

4.2.2.1. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Bitümlü bir maddenin özgül ağırlığı, hacmi bilinen 25°C 'de bir bitüm numunesinin aynı hacim ve sıcaklıktaki suyun ağırlığına bölünmesiyle elde edilen bir orandır (İlçali ve ark., 2001).

Deneyin Yapılışı:

- Boş piknometre tartma işlemi yapılır (A).
- Piknometre ağzına kadar su ile doldurulur, kapağı kapatılıp tartma işlemi gerçekleştirilir (B).
- Daha sonra bitüm numunesinden piknometreye (piknometrenin yaklaşık 2/3'ü kadar) doldurulur ve tartma işlemi yapılır (C).
- Daha sonra içine bitüm konulmuş piknometre üzerine su ilave edilir, kapağı kapatılıp 25°C'lık sıcaklıkta su banyosunda 30 dakika boyunca bekletilir ardından piknometre iyi kuruladıktan sonra tartılır (D).
- Bitüm özgül ağırlığı 3.9'da verilen bağlantı yardımı ile hesaplanır.

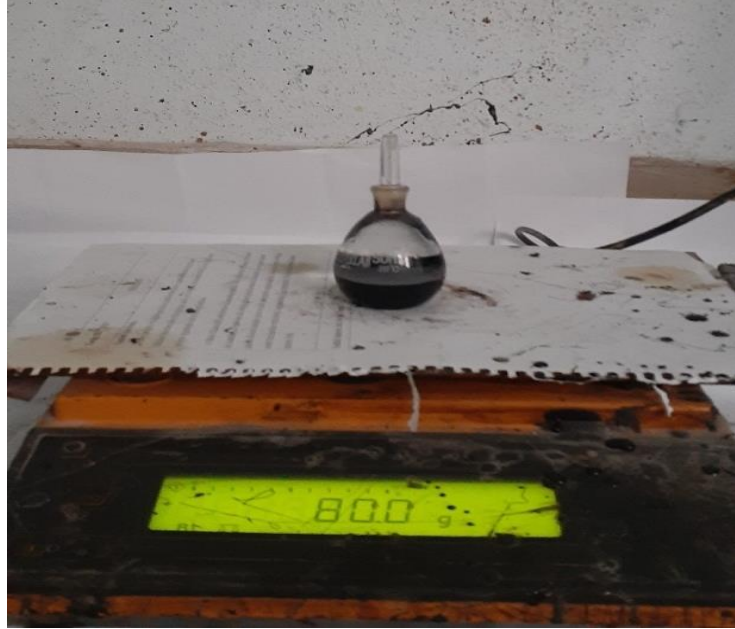
$$\text{Bitüm Özgül ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.9)$$

A = Piknometrenin boş ağırlığı

B = Piknometrenin + su ağırlığı

C = Piknometrenin + bitüm ağırlığı

D = Piknometre + su ağırlığı + bitüm ağırlığı



Şekil 4.13. Bitüm özgül ağırlığı deneyi

4.2.2.2. Penetrasyon deneyi (TS EN 1426)

Belli bir yük altında, belli bir süre zarfında ve belirli bir sıcaklıkta bitüm bağlayıcıya standart bir iğnenin düşey doğrultuda batma uzunluğu olarak tanımlanır. Penetrasyon birimi 0.1mm'dir.

Penetrasyon deneyi bitümlü bağlayıcının kıvamlılığını belirlemek amacı ile yapılmaktadır. Penetrasyon değeri 500'e kadar olan bağlayıcılarda 5 saniye süre ile 25°C sıcaklıkta 100 gr bir yük uygulanmaktadır. Penetrasyon değeri 500'den daha yüksek olan bitümlü bağlayıcılarda, deney 15°C'lik bir sıcaklıkta gerçekleşmekte ve yükleme şartları değişmektedir. Penetrasyon derecesi artıka bitüm bağlayıcının daha yumuşak ve akışkan olduğu gözlemlenir. Bitüm bağlayıcının kıvamlılığı yükseldikçe penetrasyon değeri ise azalmaktadır (İlıcılı ve ark., 2001; ESOGÜ, 2020; TS EN 1426, 2008).

Deneyin Yapılışı:

- Bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklığı 90°C'nin üzerine çıkmayacak bir biçimde ısıtılır ve daha sonra ısıtılan malzeme penetrasyon kabına dökülür.
- Numune oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Ardından 1-1,5 saat boyunca 25°C'lik bir sıcaklığı sahip su banyosunda bekletilir.
- Penetrasyon iğnesi iyice temizlenir.
- Penetrasyon cihazına numune kabı düzgün bir şekilde yerleştirilir. Numune yüzeyi ve Penetrasyon iğnesi arasındaki mesafe sıfır olacak bir biçimde ayarlanır.
- Ardından Penetrasyon iğnesi 5 saniye boyunca serbest düşmeye bırakılır.
- İğnenin kenarları, numuneye yaklaşık 1 cm uzunluğunda eşkenar bir şekilde batırılır ve üç farklı ölçüm kaydedilir. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak en yakın tam sayıya yuvarlanır.



Şekil.4.14. Penetrasyon deney cihazı

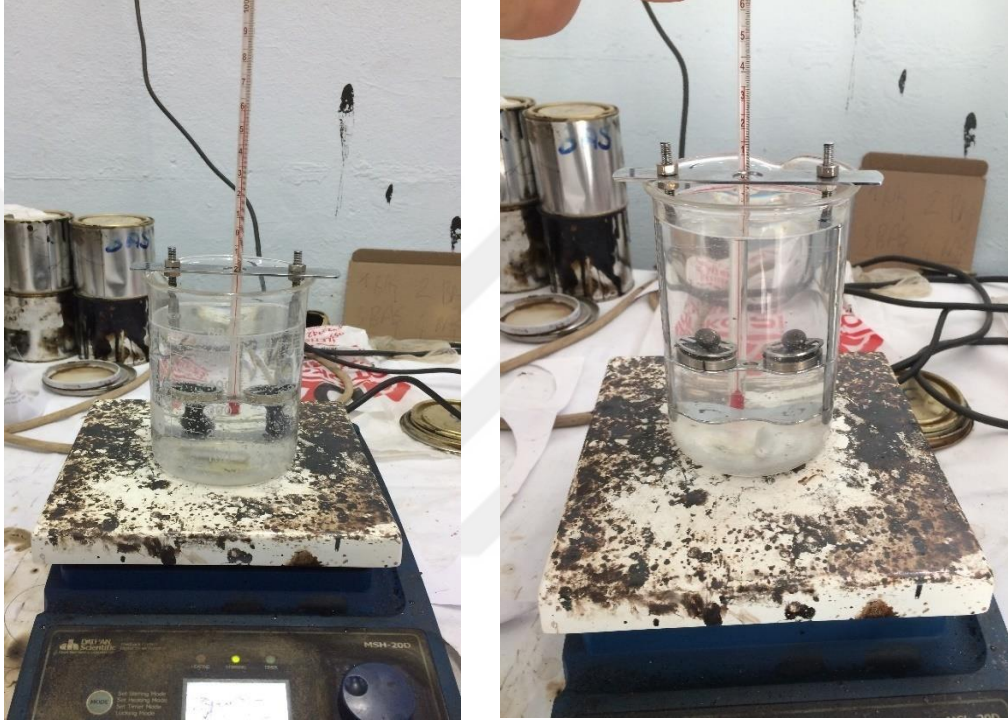
4.2.2.3.Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427)

Bu deney, bitümün sıcaklığı arttığında, hangi sıcaklıkta akışa geçmeye başladığını veya başka bir deyişle bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için yapılmaktadır. Bitümün viskozite değeri ile yumuşama noktası değeri arasında doğru bir orantı vardır. Yumuşama noktası değeri yüksek olan bir bitüm, daha yüksek bir viskozite değerine sahiptir (TS EN 1427, 2002; ESOGÜ, 2020).

Deneyin Yapılışı:

- Bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklığı 90°C'nin üzerine çıkmayacak bir biçimde ısıtılır.
- Çelik sehpa yüzeyi, bitümün kimyasal yapısını etkileyebileceği için çok ince bir vazelin filmiyle yağlanır; bu nedenle vazelinin aşırı miktarda uygulanmamasına dikkat edilir.
- Bitüm halkalar içerisine taşımaması için dikkatlice dökülür ve daha sonra oda sıcaklığında yarım saat bekletilir.
- Deneye başlamadan önce, içi su dolu cam beher, deney sıcaklığının 5°C olacak biçimde ayarlanır.

- Ardından numuneler, bilye sabitleme aparatı ve termometre; halka ve termometre düzeneğine takılır ve beher içine yerleştirilir.
- Sonrasında cam beher ısıtıcı üzerinde konulur ve deney sıcaklığı her dakikada 5°C artacak bir biçimde ısıtıcı ayarlanır.
- Deney halkaları içinde bulunan bitüm bağlayıcı, bilyelerle birlikte aşağıya sarkan kısmı düzeneğin tabanına ulaştığı zaman termometreden okunan sıcaklık değeri, bitümün yumuşama noktası değeri olarak kabul edilir.



Şekil 4.15. Yumuşama noktası deney aparatları

4.2.2.4. Viskozite deneyi

Viskozite; bitümlü bağlayıcının akmaya karşı direncini tanımlayan bir ölçüdür. Bağlayıcıların kıvamını belirlemede ve sınıflandırmasında en önemli faktör olan viskozite, bitümün sıcaklığı arttıkça, azalmaktadır. RV deneyi, bitümlü bağlayıcının çeşitli sıcaklıklardaki akıcılık özelliklerini değerlendiren bir deneydir. Bitümlü bağlayıcının karışım içerisinde belli bir akıcılığa sahip olması, agrega ile karıştırma ve serme aşamalarında son derece önemlidir. Aksi takdirde, BSK'nin serme işlemi sırasında, agrega ve bitüm bağlayıcı arasında yeterli bağlanma sağlanmaz (eksik adezyon kuvveti) ve sıkıştırma işlemi yeterince gerçekleştirilemez. Bundan dolayı, yolun trafik hizmetine açıldıktan kısa bir zaman sonra BSK'da çeşitli bozulmalara yol açmaktadır. Bunun yanı

sıra, sıcaklık faktörü bitümlü bağlayıcının akıcılığını artırırken aynı zamanda yaşlanmasına da neden olmaktadır. Bitümün Yaşlanması, büyük oranda yüksek sıcaklıklarda maruz kalmasından kaynaklanır. Dolayısıyla, BSK yapımının her aşamasında bitümün gereken akıcılık özelliklerine özen gösterilmesi ve dikkat edilmesi son derece önemlidir (Arslan, 2010).



Şekil 4.16. Viskozite deney cihazı

Bu çalışma sürecinde, bitümlü bağlayıcının viskozitesi “Brookfield DV2T” viskometre cihazı (Şekil 4.16) kullanılarak ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu Viskometre, bitümlü bağlayıcının farklı sıcaklıklardaki viskozitesini ölçebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Deneyde sıcaklık kaybı yaşanmaması için ve sıcaklığı muhafaza edebilmek amacıyla sıcaklık kontrolü olan bir termosel (termal oda) kullanılarak, vizkozite ölçümü yapılmaktadır. Bitümlü bağlayıcı içeren ve termostatik olarak kontrol edilen bir numune haznesi içerisinde spindle kullanılarak, dönmeye karşı direnci ölçülmektedir . Viskozite genellikle pascal saniye (Pa.s), milipascal saniye (mPa.s) ya da santipoise (cp) cinsinden ifade edilir. Viskozite birimi olarak yaygın bir biçimde santipoise kullanılır ve (mPa.s)’e eşdeğerdir (ASTM D4402, 2015; Akmaz, 2020).

4.2.3. Modifiye bitüm üretimi

Bitümlü bağlayıcının çeşitli kimyasal bileşenleri arasındaki karmaşık ilişkileri anlaşılması oldukça zordur. Aynı kaynaktan elde edilen ham petrol, aynı rafineride işlenmiş olsa bile farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Bu sebepten dolayı bitümün yapısı oldukça karmaşıktır ve istenilen özellikleri kontrol altına almak kolay değildir. Dolayısıyla bitüme özellik kazandırmak ve iyileştirmek için bitüme çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Son zamanlarda modifiye bitüm üretimi büyük ölçüde artış göstermektedir (Tunç, 2004).

Bir yol kaplaması yüksek sıcaklıklarda yeterli derecede rijit olmakla birlikte kalıcı deformasyonlara karşı iyi direnç gösterebilmesi ve düşük sıcaklıklarda yeterli derecede esnek olmakla birlikte çatlamaya ve kırılmaya karşı iyi direnç gösterebilmesi amacıyla bitümlü bağlayıcılar ve bitümlü karışımlar modifiye edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının modifikasyonunda bir yol kaplaması, su etkisiyle oluşan soyulmalara, ağır trafik yükleri tesiri altında yorulma esaslı meydana gelen çatlamalara karşı dayanıklı olabilmesi ve kaplama yüzeyinde istenen kayma direncini sağlayarak sürüş emniyeti arttırmayı hedeflemektedir.

Bitümlü bağlayıcı ve bitümlü karışımın özelliklerini iyileştirmek için gerçekleştirilen modifikasyon işlemleri, modifiye edici katkı maddesi belli bir oranda ve belli koşullar çerçevesinde doğrudan bitüm içine veya karışım plentinde bitümlü karışım içine eklenmesi ile yapılmaktadır. Bu yöntem ile elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, ve üretilen bitümlü karışıma “modifiye karışım” adı verilmektedir.

Bu çalışmada ise doğrudan bitüm içerisine katkı maddesi katılarak bitüm modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17’de bitümlü bağlayıcı modifiye cihazı gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Bitüm bağlayıcı modifiye cihazı

Bitümün modifiye edilmesindeki temel hedeflerden bazıları şu şekilde belirlenmiştir (Lewandowski, 1994):

- Düşük hava sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar üretebilmek ve oluşacak çatlakları en aza indirmek.
- Yüksek hava sıcaklıklarında daha sert karışımlar üretebilmek ve tekerlek izinden dolayı oluşturacak oturmayı en aza indirmek.
- Yapım sıcaklıklarında viskozite değerini düşürmek.
- Karışımın işlenebilirliğini iyileştirmek ve sıkıştırmasını kolaylaştırmak.
- Bitümlü karışımın direnç ve stabilitesini iyileştirmek.
- Bitümlü karışımın aşınmaya karşı direncini artırmak ve agrega kopmasını azaltmak.
- Karışımın yorulmaya karşı direncini artırmak.

- Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıyı tekrar gençleştirmesini sağlamak.
- Bitümlü bağlayıcının ömrünü uzatmak.
- Agregalar üstünde daha kalın bitüm filmi oluşturmak.
- Bitümlü bağlayıcının yapışma özelliğini iyileştirmek ve asfalt bağlayıcının agrega yüzeyinden soyulmasını azaltmak.
- Kusma sorununu engellemek.
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak.
- Yakıt döküntülerine karşı dayanım artışı sağlamak.
- Normalden daha ince kaplama tabakları yapım imkânı sağlamak

Modifiye edici katkı maddesinin etkili, kullanışlı ve ekonomik olabilmesi için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekmektedir (Whiteoak, 2004):

- ✓ Uygun maliyetli ve kolay temin edebilir olması gerekir.
- ✓ Bitümlü bağlayıcı ile karıştırınca özelliklerini kaybetmemelidir.
- ✓ Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitümlü bağlayıcı aşırı viskoz bir hale getirmemeli, ayrıca bitümlü bağlayıcı sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında da aşırı rijit bir hale getirmemelidir.
- ✓ Yolun yüksek sıcaklıklarda direncini akmaya karşı arttırılması gerekmektedir.

Bitümlü bağlayıcı ve bitümlü karışımların modifiye edilmesinde etkili olan bazı hususları aşağıda sıralanmıştır (Ilıcalı ve ark., 2001).

- ❖ Ham petrol ve bitüm fiyatlarında her zaman artış riski bulunmaktadır.
- ❖ Artan maliyetler yüzünden daha ince kaplamalar inşa edilmektedir. Bu durum kaplama hizmet ömründe düşüslere sebep olmuştur.
- ❖ Trafik yüklerinde son zamanlarda önemli artışlar görülmektedir.
- ❖ Sınırlı kaynak sorunları yüzünden yapılması gereken onarımların zamanında gerçekleştirilmemesi yaygın olarak rastlanmaktadır.
- ❖ Endüstriyel atıkların taşınması ve ortandan tamamen kaldırılamaması gibi sorunların sonucunda meydana gelen ekonomik ve çevreci baskılar, bu atıkların bitüm modifiye edici katkı maddeleri olarak kullanımına sebep olmuştur.
- ❖ İnşaat alanındaki ekipmanların gelişmesi, katkı kullanımını mümkün kılacak bir düzeye ulaştırmıştır.

Çizelge 4.5. Kimyasal katkıların bitümlü karışımlara sağladığı avantajlar (İlcalı ve ark., 2001)

Kimyasal katkılar	Yaşlanma Sertliğini azaltma	Rutubet zararı hassasiyetini azaltma	Agrega bağlayıcı değişikliği	İşlenebilirlik gelişimi	Adezyon gelişimi	Stabilite artma	Tekerlek izi direncinde artma	Soyulmaya karşı özelliklerinde gelişme	Gevreklikte artma
Hidrate kil	×	×		×	×	×	×	×	×
Portland çimentosu				×	×	×	×		
Manganez modifiyesi			×	×	×		×	×	×
Katyonik Yüzey aktif ajanları	×	×		×	×	×			
Sülfür				×		×	×		×
Organik polimerler				×		×	×		

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, iki alt bölümden oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmada kullanılan agrega, filler, bitüm, atık plastik ve diğer malzemeler hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem bölümünde agrega ve bitümün özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar, Marshall stabilite deneyi ve karışımın işlenebilirliğini belirlemek için kullanılan GTM yöntemi hakkında bilgiler verilmektedir.

5.1. Materyal

5.1.1. Agrega

5.1.1.1. Asfalt betonu için kullanılan agrega

Bu çalışma bünyesinde kullanılan agrega türü kalker ve Aksaray yolunda bulunan Öztaş firmasından temin edilmiştir.

5.1.1.2. TMA için kullanılan agrega

Bu çalışma bünyesinde kullanılan agrega türü bazalt ve Niğde ilinden bulunan AS Beton firmasından temin edilmiştir.

5.1.2. Bitümlü Bağlayıcı

Tez çalışma kapsamında Kırıkkale rafinerisinde üretilmiş 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

5.1.3. Plastik

5.1.3.1. Asfalt betonu için kullanılan plastik

Bu çalışması kapsamında AB karışımı için atık naylon poşet AYPE, YYPE, PP ve PE türünden plastikler kullanılmıştır.

5.1.3.2. Taş mastik asfalt için kullanılan plastik

Bu çalışması kapsamında TMA karışımı için atık polipropilen (PP) kullanılmıştır.

5.1.4. Katkı maddesi

Çalışma kapsamında TMA karışımının üzerinde ektilerini araştırmak için SBS katkı maddesi ve fazla bitüm içeren bu karışımlarda, bitümün akmasını engellemek ve agregalar arasındaki bağları güçlendirmek için selülozik elyaf (Viatop) kullanılmıştır.

5.2. Yöntem

Yöntem kısmında ise tez çalışması doğrultusunda uygulanan deneylerin yöntemleri açıklanmıştır.

5.2.1. Agregada deneyleri

Çalışma kapsamında, asfalt beton karışımlarında kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneyi, agregaların boyut dağılımını belirlemek için kullanılmıştır. Bu deney, farklı boyutlardaki eleklerden geçirilen agregaların boyut dağılımını belirleyerek karışımın granülometrisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Los Angeles aşınma deneyi ile agregaların aşınma direnci değerlendirilmiştir. Belirli bir tambur içinde döndürülerek yapılan bu deney, agregaların aşınma direncini ölçerek karışımın dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler sağlar. Özgül ağırlık ve su emme deneyleri ise agregaların özgül ağırlığını ve su emme kapasitesini belirlemek üzere gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, bitümlü sıcak karışımlarının malzeme kalitesini değerlendirmek ve karışımın mühendislik özelliklerini optimize etmek için son derece önemlidir.

5.2.2. Bitümlü bağlayıcı deneyleri

Çalışma kapsamında, bitümlü bağlayıcı malzemenin özelliklerini belirlemek amacıyla üç farklı deney gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Bu deney, bitümlü bağlayıcının birim hacminin ağırlığını belirleyerek malzemenin yoğunluğunu ölçmeyi amaçlar. İkinci olarak, penetrasyon deneyi uygulanmıştır. Penetrasyon deneyi, bitümlü bağlayıcının yumuşaklığını değerlendirmek için kullanılır. Malzemenin bir iğne tarafından belirli bir yük altında ne kadar derinlemesine nüfuz ettiği ölçülerek elde edilen penetrasyon değeri, bitümlü bağlayıcının sertlik derecesini gösterir. Son olarak, yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Bu deney, bitümlü bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığını belirlemek için gerçekleştirilir. Yumuşama noktası, bitümlü malzemenin belirli bir sıcaklıkta ne kadar yumuşadığını gösterir ve bu, karışımın belirli



(a) Reaktör

(b) Direnç telleri

(c) kalınlaştırılmış boru hali



(d) soğutucu banyosu

(e) sıvı toplama kapları

Şekil 5.2. Piroliz deney sistemin ekipmanları.

Kontrol biriminde, piroliz deney sisteminin açma ve kapama düğmesi ve bunun dışında sıcaklık ile ısıtma hızının düzenlenmesini sağlayan kontrol düğmeleri mevcuttur. Reaktör içerisinde bozulan numunenin akışı, reaktör kapağına monte edilmiş kalın çaplı boru, bağlantı borusu ve sıvı ürünlerin toplandığı kapları tutan boru sayesinde sağlanmaktadır. Sonrasında borulardan geçen ürünler soğutucu sistemine gelmektedir ve yoğunlaştırma biriminde gelen bu ürünler sıvı ürüne dönüşerek, sıvı ürünlerin toplanması için tasarlanan kaplarda biriktirilir. Sıvı ürünü kapların (Şekil 5.2.e) soğutucu içerisine (Şekil 5.2.d) dikey duracak bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir.

Yoğunlaştırılmayan malzemeler, sıvı ürünlerin kaplarını tutan boru geçerek ona bağlanan hortum sayesinde gaz ürünü olarak dışarıya salınmaktadır. Piroliz işlemi sırasında Oksijenin bulunmadığı bir ortam yaratmak amacıyla Azot gazı (N_2) gerekmez. Azot gazının akışını sağlayabilmek amacıyla, reaktörün kapağına monte edilmiş küçük çaplı boruya (Şekil 5.2.a'da sağ taraftaki boru) Azot gazı bağlanmaktadır.

Piroliz deney sisteminin işleyişini incelediğimiz zaman; piroliz işlemi için belirli bir sıcaklık ayarladığında, bu sıcaklıkta ısıtma işleminin durduğunu ancak sistemin sıcaklığı artmaya devam ettiğini gözlemliyoruz. Bu durumunun nedeni; reaktör sistem

tarafından çalıştırıldıktan sonra, deney başlamadan önceki belirlenen ısıtma hızı ve sıcaklığına göre ısıtılmaktadır. Belirlenen sıcaklığa sistem ulaştığı zaman ısıtma işlemi durdurulmaktadır. Ancak deney sürecinde direnç tellerinde enerji birikir ve reaktöre ısı aktarma işlemi devam etmektedir (Akmaz, 2020).

5.2.4. Marshall tasarım yöntemi (TS 12697-30)

Bitümlü sıcak karışımlar, agregalar iyice kurutularak işlenebilirlik özelliklerini artırmak amacıyla ısıtılması ve bitümlü bağlayıcı ile bir sıcak karışım plentinde karıştırılarak elde edilen karışımlardır. Sıcak karışımları tasarlarken, optimum bitüm oranını belirleyerek dayanıklı bir üst yapı inşa etmek, sıkıştırılmış asfalt tabakasında belli bir boşluk oranı sağlayarak trafik yüklerinin etkisi altında meydana gelebilecek akma ve kuma gibi sorunları önlemek, asfalt tabakasında oluşacak deformasyonlara karşı dayanıklılık sağlamak ve uygun maliyetli karışımlar üretebilmek gibi amaçlar hedeflenmektedir (Alp, 2018).

Deneyin yapılışı:

- Çapları 0.075mm-25mm arasında değişen ve gradasyonu belirlenmiş olan agrega artı filler malzemesinden 1150gr agrega numunesi hazırlanır. Daha sonra bu numuneler bitümlü sıcak karışımın karıştırma sıcaklığına göre etüve bir gün önceden ısıtılmaya bırakılır. Bitümlü bağlayıcı ise deneyden 2-3 saat önce ısıtılması yeterlidir.
- Marshall tasarım deneyinde kullanılan numune kalıpları, kürek ve şişleme çubuğu, deney esnasında ısı kaybı gerçekleşmemesini önlemek amacıyla ısıtılır.
- Etüvden çıkarılan agrega ve bitüm bağlayıcı mikserde 1,5-2 dakika arasında iyice karıştırılması gerekir. Karıştırma sırasında ısı kaybını önlemek amacıyla mikserin altında ısıtıcısı yerleştirilir.
- Her bitüm oranı için 3 adet numune hazırlanır. Karıştırılmış numune briquete (64 mm bir yüksekliği ve 101,6 mm çapı sahip olan silindirik numune kalıpları) kürek ile şişlenerek yerleştirilir. Malzemenin yapışmaması için briketin altında ve üstünde kâğıt konulur.
- Ardından briket Marshall tokmağı cihazına konulur ve sıkıştırma işlemi numunenin her iki yüzeyine 75 vuruş yapılarak gerçekleştirilir.
- Numuneler soğuduktan sonra bir kriko yardımı ile kalıptan çıkartılır ve bir gün boyunca oda sıcaklığına bırakılır.

- Daha sonra hazırlanmış Marshall numuneleri kumpas aleti ile 3 farklı yerden yükseklikleri ölçülür. Ardından havada (A), suda (B) ve suya doymun yüzey kuru (C) ağırlıkları tartılarak belirlenir.
- Daha sonra Marshall numunelerin dayanım ve akma değerlerini elde etmek için, numuneler 60°C'lik su banyosunda 30-40 dakika boyunca bekletilir. Daha sonra su banyosundan çıkartılan numuneler Marshall dayanım cihazına konulur. Daha sonra numuneye belirli şartlar altında yüklemeler yapılarak dayanım ve akma değerleri elde edilir (ESOGÜ, 2020; Ilıcal ve ark., 2001).

Deneyin hesaplamalarında kullanılan formüller;

a) Özgül Ağırlıkların Bulunması:

Bitümlü karışımda kullanılmış olan kaba taneli agregası, ince taneli agregası ve mineral fillerin farklı özgül ağırlıkları vardır. Aşağıda verilen formüllerin yardımı ile toplam agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlıkları hesaplanmaktadır. Hesaplarda filler için hacim özgül ağırlık yerine zahiri özgül ağırlık kullanılabilir (ESOGÜ, 2020; Ilıcal ve ark., 2001).

$$\text{Agrega hacim özgül ağırlığı } G_{sb} = \frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%I}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (5.1)$$

$$\text{Agrega zahiri özgül ağırlığı } G_{sa} = \frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%I}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (5.2)$$

G_{sb} : Agregası karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{sa} : Agregası karışımının zahiri özgül ağırlığı

% K, % I, % F: Agregaların(kaba, ince ve filler) ağırlıkça yüzdeleri

G_{ka} , G_{ia} , G_{fa} : Agregaların zahiri özgül ağırlıkları

G_{kb} , G_{ib} : Agregaların hacim özgül ağırlıkları

Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı aşağıda verilen bağlantı yardımı ile hesaplanır.

$$\text{Agreganın efektif özgül ağırlığı } G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{DT} - \frac{W_a}{G_b}} \quad (5.3)$$

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı (bitüm absorbe eden boşluklar hariç tüm boşluk hacimlerini içermektedir).

W_a : Agreganın yüzdesi olarak bitüm

D_T : Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı.

G_b : Bitüm özgül ağırlığı

Agrega asfalt hacmini su hacmine göre daha az absorbe edebilir, dolayısıyla agreganın efektif özgül ağırlık değeri, agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında yer almalıdır. D_T deneyi (ASTM 2041) yapılmadığı zaman, zahiri ve hacim özgül ağırlık değerlerinin ortalaması efektif özgül ağırlık değeri olarak kullanabilmektedir.

b) Bitüm yüzdelere göre karışımın maksimum özgül ağırlığı:

Bitüm yüzdesindeki hava boşluğunu hesaplamak için, farklı bitüm yüzdelesindeki maksimum özgül ağırlığa ihtiyaç duyulmaktadır.

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (5.4)$$

D_T : Kaplama karışımının boşluksuz maksimum teorik özgül ağırlığı

W_a : Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b : Bitümün özgül ağırlığı

c) Bitüm absorpsiyonu:

Agregalar tarafından absorbe edilen bitüm miktarı aşağıda verilen bağlantı ile hesaplanır.

$$P_{ba} = 100 \left(\frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{ef} \times G_{sb}} \right) \times G_b \quad (5.5)$$

P_{ba} : Absorbe edilen bitüm, agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak f

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı

G_b : Bitümün özgül ağırlığı

Genelde sadece agregaların dışını kaplayan bitüm oranı aşağıdaki bağlantı ile hesaplanır.

$$P_{be} = W_a - P_{ba}$$

W_a : Agreganın ağırlıkça ifadesi olarak bitüm

P_{ba} : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm

P_{be} : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif edilen bitüm

d) Sıkıştırılmış karışımdaki VMA yüzdesi

VMA, efektif bitüm yüzdesi ve hava boşluğunu içeren bir tanım olup agregalar arası boşluk yüzdesi olarak tanımlanır. Aynı zamanda VMA sıkıştırılmış kaplamada agrega taneleri arasındaki boşluk olarak da tanımlanır.

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \quad (5.6)$$

VMA: Agregalar arası boşluk yüzdesi

D_p : Sıkıştırılmış kaplama karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı

W_a : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

e) Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi:

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (5.7)$$

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (5.8)$$

V_h : Toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşluğu

V_f : Bitümle dolu boşluk

D_T : Toplam karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı

D_p : Sıkıştırılmış karışımın (briketin) hacim özgül ağırlığı

Marshall tasarım deneyinden elde edilen sonuçlara göre, her bitüm yüzdesi için briketlerin yüksekliklerin ortalaması alınır. Ardından D_p 'ler (pratik yoğunluk) hesaplanır ve D_T (teorik özgül ağırlık), V_h (hava boşluğu), VMA (agregalar arası boşluk), V_f (asfaltla dolu boşluk), düzeltilmiş stabilite, ortalama stabilite ve akma değerleri hesaplanır. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki grafikler çizilir (Orhan, 2012).

- D_p - %Bitüm
- Stabilite -%Bitüm
- V_f - %Bitüm
- V_h - %Bitüm
- Akma - %Bitüm
- VMA - %Bitüm

Grafikler çizildikten sonra, pratik özgül ağırlık (D_p), asfaltla dolu boşluk yüzdesi, stabilite ve boşluk yüzdesine göre şartname koşullarına uygun bulunan optimum bitüm değerlerinin ortalaması alınarak, tasarımın optimum bitüm değeri bulunur (İlcalı ve ark, 2001).

$$\text{Optimum bitüm (\%)} = \frac{D_p \text{ için } W_a + V_h \text{ için } W_a + V_f \text{ için } W_a + \text{Stabilite için } W_a}{4}$$

Başka dikkat edilmesi gereken hususlardan bölgenin iklim şartları dikkate alınarak bitüm oranı tayin edilir. Soğuk bölgelerde, dayanıklı ve çatlaklara karşı dirençli bir kaplama tabakası inşa edebilmek için bitüm oranı daha fazla ama kuma sorunu ortaya çıkartmayacak karışımlar tercih edilmektedir. Sıcak bölgelerde, plastik deformasyonu azaltacak fakat yeterli durabiliteyi sağlayacak karışımlar tercih edilmektedir (Orhan, 2012).

5.2.5. Gyrator Sıkıştırma Makinesi (*Gyratory Compactor Machine*)

Bu çalışma kapsamında, karışımların işlenebilirliğini belirlemek amacıyla Gyrator Sıkıştırma Makinesi (GSM) kullanılmıştır. Gyrator Sıkıştırma Makinesi (GSM) cihazı bir dizi bileşenlerden oluşmaktadır: deneyde kullanılan numuneyi yerleştirmek ve sıkıştırmak için kullanılan (yükleme çerçevesi), sıkıştırma işlemi gerçekleştirebilmek amacıyla tasarlanan mekanik sistem ve sıkıştırma kolu, karışımın sıkıştırma işlemi gerçekleştirilirken dönen taban, sıkıştırma işlemi sırasında uygulanan kuvveti ölçen basınç göstergesi, döner tabanın çalışmasını sağlayan motor, numunenin yüksekliğini ölçebilen sistem ve bu bilgileri bilgisayara aktarabilecek özelliği sahip kayıt sistemi, deney için kullanılan numuneyi dökmek için kalıp ve numune altında konulan taban plakası, deney bittikten sonra numuneyi kolaylıkla çıkartabilmek için numune çıkartma bölümü ve deney sırasından hesap edilen bütün parametreleri kaydedebilmek ve kontrol edebilmek için kullanılan bilgisayar destekli sistem gibi bölümlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler bitümlü sıcak karışımların sıkıştırma işlemi belli koşullarda gerçekleştirilebilmek amacıyla bir araya getirilmiştir. Şekil 5.3'te GSM cihazı ve Şekil 5.4'te GSM cihazın şematik gösterimi ve deney sırasında kalıp hareketin biçimi gösterilmektedir.

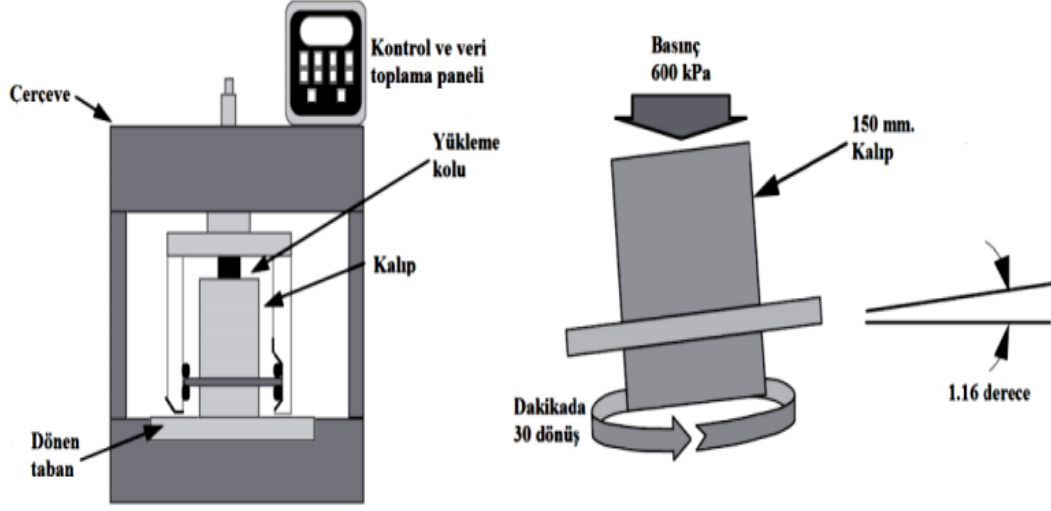
Bir GSM'nin sıkıştırma işlemi düzenleyen ana parametreler aşağıda verilmiştir: (Buncher ve ark., 2014)

- Numunenin üzerine uygulanan 600 ± 18 kPa değerinde dikey basınç.

- Numunenin belli bir eğimle sıkıştırılmasını sağlayan iç kalıp için $(1.16 \pm 0.02)^\circ$ ve dış kalıp için $(1.25 \pm 0.02)^\circ$ döneme açısı.
- Numuneyi, dakikada 30.0 ± 0.5 dönüş hızı yaparak belli bir dönme hızı ile sıkıştırılmasını sağlayan “dönerek sıkıştırma hızı”.
- Numunenin sıkıştırması için belli bir süre boyunca belirlenen “dönerek sıkıştırma sayısı”. Dönerek sıkıştırma sayısı beklenen trafik seviyesine göre belirlenmektedir.



Şekil 5.3. Gayrator Sıkıştırma Makinesi



Şekil 5.4. GSM cihazın şematik gösterimi ve kalıp hareketinin biçimi (Buncher ve ark., 2014)

Tüm parametrelerin deney sırasında dikkatli ve doğru bir şekilde ayarlanması gerekirken, numune sıkıştırması üzerindeki dönme açısının büyük bir etkisi gözlemlenmiştir. Dönme açısı arttıkça sıkıştırma çabası da artış gösterir ve benzer bir biçimde dönme açısı azalır, sıkıştırma çabası azalır. Dönme açısındaki çok küçük değişiklikler sıkıştırma düzeyinde büyük değişikliklere yol açmaktadır ve açıda herhangi bir sapma meydana gelmemesi için iyi kalibre edilmiş bir sıkıştırıcıyı korumak son derece önemlidir. Deney sırasında üretilen numune üzerinde kalıp dönerken sistem tarafından sabit bir konsolidasyon basıncı uygulanmaktadır. Numunenin gerekli yoğunluğu sahip olabilmesi için, sıkıştırma işlemi sırasında bilinen bir dönme açısı ve sabit bir basınç sağlanması kritik bir öneme sahiptir. GSM modellerinin dönme açısını düzenlemek ve korumak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. GSM numune kalıpları yükleme sırasında deformasyonlara karşı iyi direnebilmesi için minimum 7,5 mm kalınlığında çelik duvarlı olarak tasarlanmış ve 150 mm çapındadır. Bazı belirli amaçlar için 100 mm çapında kalıplar da kullanılır. Deney sonuçlarında hataları önleyebilmek amacıyla, her deneyden sonra kalıplar ve ekipmanlar iyi bir şekilde temizlenmelidir ve üretici firmanın önerilerine uygun davranmalıdır (Buncher ve ark., 2014).

GSM, sıkıştırma işlemi boyunca sabit bir açı ayarlanıp istenilen basınç uygulanmaktadır. Sıkıştırma işlemi, istenen son noktaya (hacimsel özellikleri belirlemek için gereken dönüş sayısına) ya da (mekanik özellikleri belirlemek için belli bir

yüksekliğe) kadar devam etmelidir. Sıkıştırma parametreleri 600 ± 60 kPa ilk 5 dönüş sayısı için ve geri dönüş sayısı için 600 ± 18 kPa, dakikada 30 ± 0.5 dönüş sayısı; iç (alt ve üst taban plakalarıyla kalıp iç duvarı arası) ve dış (GSM çerçevesiyle kalıp dış duvarı arası) açılar sırasıyla 20.25 ± 0.35 mrad ($1.16 \pm 0.02^\circ$), 21.82 ± 0.435 mrad ($1.25\pm 0.02^\circ$) ayarlanmalıdır (ASTM D6925, 2015).

Deneyin yapılışı:

- Çapları 0.075mm-25mm arasında değişen ve gradasyonu belirlenmiş olan agregaya ve filler malzemesinden 4700gr agregaya numunesi hazırlanır. Daha sonra bu numuneler bitümlü sıcak karışımın karıştırma sıcaklığına göre etüve bir gün önceden ısıtılmaya bırakılır. Bitümlü bağlayıcı ise deneyden 2-3 saat önce ısıtılması yeterlidir.
- GSM tasarım deneyinde kullanılan numune kalıpları, kürek ve şişleme çubuğu, deney esnasında ısı kaybı gerçekleşmemesi için ısıtılır.
- Etüvden çıkarılan agregaya ve bitüm bağlayıcı malzemesi mikserde 2-3 dakika süre ile karıştırılır. Karıştırma esnasında ısı kaybını önlemek için mikserin altında ısıtıcısı yerleştirilir.
- Karıştırılmış numune kalıba (150mm çapında silindirik numune kalıbı) kürek ile şişlenerek yerleştirilir. Malzemenin yapışmaması için kalıbın altında ve üstünde kâğıt konulur.
- Daha sonra numune ile doldurulmuş kalıp GSM cihazında dikkatlice yerleştirilir ve kapağı kapatılır.
- Bilgisayarda daha önceden girilen deney özelliklerini kontrol edip karışımın ağırlığı girilir ve cihazdaki yeşil tuşa basılarak deney başlatılır.
- Deney bittiği zaman otomatik bir şekilde durur ve bilgisayardan deney verileri kaydedilir.

- Deney bittiği gibi kalıbı çıkartma yerine yerleştirilerek çıkartılması gerekir. Ama numunenin dağılması için çıkartılan numune kalıbın üstünde 20-30 dakika bekletilmektedir. Şekil 5.5'te deneyde kullanılan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 5.5. GSM tasarım deneyin aşamaları

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışma kapsamında, Asfalt Betonu Tip-1 ve TMA Tip-1 için tasarım yapılmıştır.

Asfalt betonu karışımı için, kaba taneli agrega, ince taneli agrega ve filler olarak kalker kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Çalışma doğrultusunda üç tip karışım, 50/70 bitüm ile katkısız, Naylon poşet karışımın (YYPE, AYPE, PET ve PP) piroliz ile elde edilen katkı maddesinden %3 ve %5 oranlarında modifiye edilmiş 50/70 bitüm ile hazırlanmıştır. Asfalt betonu karışımın tasarım özellikleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 1. Asfalt betonunun karışım özellikleri

Kullanılan agrega	Bitüm penetrasyonu	Modifiye bitüm katkısı
Kalker	50/70	Katkısız
Kalker	50/70	%3 Naylon poşeti
Kalker	50/70	%5 Naylon poşeti

TMA karışımı için, kaba agrega, ince agrega ve filler olarak bazalt kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Çalışma doğrultusunda üç tip karışım, 50/70 bitüm ile katkısız, Polipropilen pirolizi sonucunda elde katkı maddesi ile modifiye edilmiş 50/70 bitüm ve SBS katkı maddesi ile modifiye edilmiş 50/70 bitüm ile karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca, karışımların içerisindeki bitümün akmasını engellemek için selülozik elyaf kullanılmıştır. TMA karışımın tasarım özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6. 2. TMA karışımın özellikleri

Kullanılan agrega	Bitüm penetrasyonu	Modifiye bitüm katkısı	Elyaf
Bazalt	50/70	Katkısız	Selülozik elyaf
Bazalt	50/70	%5PP	Selülozik elyaf
Bazalt	50/70	%4,5SBS	Selülozik elyaf

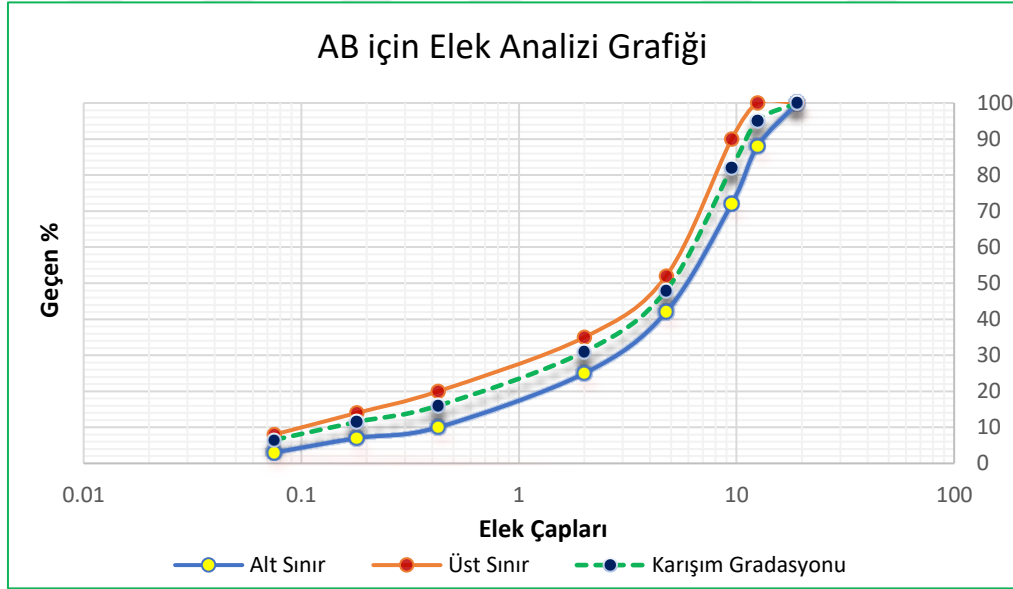
6.1. Agrega Deneyleri

6.1.1. Elek analiz deneyi

Asfalt betonu karışımı için kullanılan agrega tane dağılımını belirlemek amacıyla agrega elek analiz deneyi yapılmıştır. Karışımın gradasyonu, KTŞ'de asfalt betonu aşınma tabakası Tip-1 için verilen sınır değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Çizelge 6.3'te elek çapları ve agrega miktarları ve Şekil 6.1'de çizilen gradasyonu eğrisi gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Asfalt betonu karışım gradasyonu

Elek boyu		Agrega miktarı(g)	Tasarım için Kalan (%)	Tasarım için Geçen (%)	En az Geçen (%)	En fazla Geçen (%)
İnce	mm					
3/4	19	0	0	100	100	100
1/2	12,5	57,5	5	95	88	100
3/8	9,5	149,5	13	82	72	90
No.4	4,75	391	34	48	42	52
No.10	2,00	195,5	17	31	25	35
No.40	0,425	172,5	15	16	10	20
No.80	0,180	51,75	4,5	11,5	7	14
No.200	0,075	57,5	5	6,5	3	8
		74,75	6,5			
Toplam		1150				



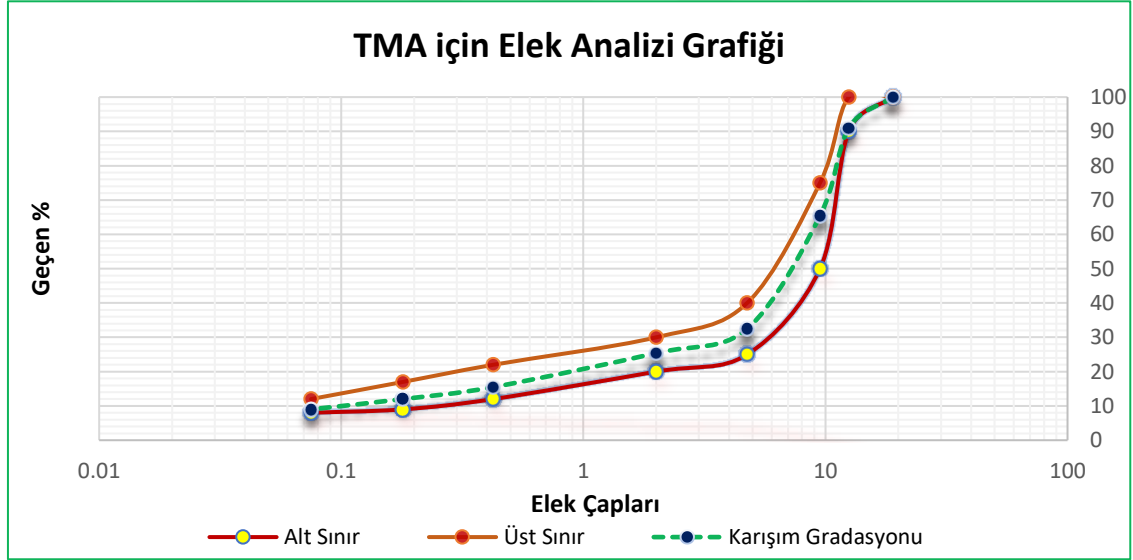
Şekil 6.1. Asfalt betonun elek analizi grafiği

Aynı şekilde TMA karışımın gradasyonu, karayolu şartnamesinde asfalt betonu aşınma tabakası Tip-1 için verilen sınır değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Çizelge

6.4'te elek çapları ve agrega miktarları ve Şekil 6.2'de çizilen gradasyonu eğrisi gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. TMA karışım gradasyonu

Elek boyu		Agrega miktarı(g)	Tasarım için Kalan (%)	Tasarım için Geçen (%)	En az Geçen (%)	En fazla Geçen (%)
İnç	mm					
3/4	19	0	0	100	100	100
1/2	12,5	103,5	9	91	90	100
3/8	9,5	294,4	25,6	65,4	50	75
No.4	4,75	378,35	32,9	32,5	25	40
No.10	2,00	81,65	7,1	25,4	20	30
No.40	0,425	113,85	9,9	15,5	12	22
No.80	0,180	40,25	3,5	12	9	17
No.200	0,075	34,5	3	9	8	12
		103,5	9			
Toplam		1150				



Şekil 6.2. TMA elek analizi grafiği

6.1.2. Agregada deney sonuçları

AB karışımı için kullanılan kalker agrega üzerinde yapılan agrega deney sonuçları, Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Agregada deney sonuçları

Agregada deneyi	Kaba agrega	İnce agrega	Filler
Hacim özgül ağırlık	2,66	2,64	-
Zahiri özgül ağırlık	2,73	2,72	2,74
Su emme (%)	0,85	0,91	-
Los Angeles (%)	26		

TMA karışımı için kullanılan bazalt agregası üzerinde yapılan agregası deney sonuçları, Çizelge 6.6'de gösterilmiştir (Sultani, 2021).

Çizelge 6.6. TMA için agregası deney sonuçları

Agregası deneyi	Kaba agregası	İnce agregası	Filler
Hacim özgül ağırlık	2,604	2,61	-
Zahiri özgül ağırlık	2,74	2,746	2,705
Su emme (%)	1,87	1,92	-
Los Angeles (%)	14		

6.2. Piroliz Deney Sonuçları

Plastiklerin birçok sektörde geniş kullanım alanları vardır, bu sebeple küresel plastik üretim günden güne artmaktadır. Plastik talebindeki artış sonucunda; depolama alanların plastik atıklar ile doldurulması, çevremizde görüntü kirliliği yaratmakta ve petrol esaslı malzemelerden üretildikleri için ve yenilenemeyen fosil yakıtların bir sonucu oldukları için de petrolün tükenmesi gibi sorunlara neden olmaktadır. Plastik atıkları yönetebilmek amacıyla geliştirilmiş bazı geri dönüşüm ve enerji kazanım yöntemleri bulunsada plastiklerin ayrıştırılması yüksek işçilik maliyetli olduğundan dolayı, geri dönüşümün bazı dezavantajları bulunmaktadır. Dolayısıyla araştırmacılar yüksek enerji talebini karşılayabilmek amacıyla enerji geri kazanım yöntemi üzerine çalışmalarını yöneltmişler. Detaylı araştırmalar ve bu yolda geliştiren teknoloji sayesinde atık plastik atıkların enerjiye geri dönüştürülmesi mümkün bir hale gelmiştir. Plastiklerin ana kaynağı petrol olduğu için, piroliz işlemiyle sıvı yakıtı geri kazandırılması için büyük bir potansiyele sahiptir (Sharuddin ve ark., 2016; Akmaz, 2020).

Piroliz deneyinde, deneyin sıcaklığı en önemli faktördür, deneyin sıcaklık derecesi değiştirilince elde edilen sıvı ve katı ürünlerin oranları da değişmektedir. Akmaz (2020) tarafından yapılan çalışmada bitümlü bağlayıcıya katkı olarak, çeşitli plastik karışım grupları için 300–350°C sıcaklıklar arasındaki piroliz ürünlerinin değerlendirilmesinin daha doğru olduğunu belirlenmiştir (Akmaz, 2020).

6.2.1. Atık naylon poşet pirolizi

Asfalt betonu karışımı için atık naylon poşeti, piroliz işlemine tabi tutularak elde edilen katı malzemesi, bitüm modifiye edici katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmıştır. Naylon poşeti çeşitli plastiklerden üretilmektedir. Bu çalışmada kullanılmış naylon poşetleri YYPE, AYPE, PET ve PP plastik türlerinden piroliz

işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney hakkında daha önce fikir sahip olmadığımız için, deney sıcaklığı değiştirilerek elde edilen sıvı ve katı malzemelerin verimleri hesaplanmıştır. Deney için 1000gr numune hazırlanarak, malzemenin hacmine göre sadece 500gr malzeme reaktöre yerleştirilmiştir. Çizelge 6.7’de plastik oranları ve Şekil 6.3’te piroliz için küçük parçalara kesilmiş plastik malzemesi gösterilmiştir.

Çizelge 6.7. Plastik türlerine göre miktarları

Plastik Türü	Plastik Miktarı (gr)
YYPE	150
AYPE	300
PET	300
PP	250



Şekil 6.3. Piroliz deneyi için hazırlanmış malzeme

Yapılan ilk deneyde, 500gr’den oluşan plastik karışımı reaktöre konulmuş, daha sonra cihazın kontrol biriminde; ilk sıcaklık 75°C olarak ayarlanmıştır. Deneyin başlaması ile, 20–25 dakika süresince sisteme Azot gazı akışı sağlanmıştır. Deney sistemin ulaştığı azami sıcaklık, göstergeden 216°C olarak okunmuştur ve ardından sıcaklık düşüşü ile, deney 177°C bir sıcaklıkta sonlandırılmıştır. İlk yapılan piroliz deneyin sonucunda malzeme kimyasal bir değişime uğramamış ve reaktör içerisinde 450gr katı bir malzeme tartılmıştır.

İkinci piroliz deneyinde, ilk sıcaklık 225°C olarak ayarlanmış, deney sistemin ulaştığı azami sıcaklık göstergeden 369°C olarak okunmuştur ve ardından sıcaklık düşüşü ile deney sonlandırılmıştır. Bu deneyin sonucunda 33gr katı maddesi toz halinde (Şekil 6.4) ve 272,7gr sıvı maddesi (Şekil 6.5) elde edilmiştir. Katı ve sıvı ürünlerin verimi aşağıda verilen bağlantılar yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\%Katı = \frac{Katı\ maddesi(gr)}{Toplam\ hammadde(gr)} \times 100 \implies \%Katı = 6,60$$

$$\%S_{IV1} = \frac{S_{IV1} \text{ maddesi}(gr)}{Toplam \text{ hammade}(gr)} \times 100 \implies \%S_{IV1} = 54,54$$

$$\%Gaz = 100 - (\%Katı + \% S_{IV1}) \implies \%Gaz = 38,86$$

İkinci piroliz deneyi sonucunda elde edilen katı malzemesi tatmin edici olmayıp daha düşük sıcaklıkta daha önceki deneylere benzer 500gr plastik karışımı reaktöre konulmuş, ilk sıcaklık 175°C olarak ayarlanmıştır. Deney sistemin ulaştığı azami sıcaklık göstergeden 306°C olarak okunmuştur ve ardından sıcaklık düşüşü ile deney 185°C sıcaklıkta sonlandırılmıştır. Bu deneyin sonucunda katı maddesi mavimsi bir renge sahip (Şekil 6.4) 410gr bir malzeme elde edilmiştir. Bu malzeme, daha önce gerçekleştirilen atık plastik piroliz deneylerine oldukça benzediği için tatmin edici bir sonuç olarak kabul edilmiştir. Katı ve sıvı ürünlerin verimi aşağıda verilen bağlantılar yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\%Katı = \frac{Katı \text{ maddesi}(gr)}{Toplam \text{ hammade}(gr)} \times 100 \implies \%Katı = 82$$

$$\%S_{IV1} = \frac{S_{IV1} \text{ maddesi}(gr)}{Toplam \text{ hammade}(gr)} \times 100 \implies \%S_{IV1} = 6$$

$$\%Gaz = 100 - (\%Katı + \% S_{IV1}) \implies \%Gaz = 12$$



Şekil 6.4. Piroliz deneyi sonucunda elde edilen katı maddesi



Şekil 6.5. 225°C'lik sıcaklık sonucunda elde edilen piroliz sıvı maddesi

6.2.2. Atık polipropilen pirolizi

TMA karışımı için atık Polipropilen, piroliz işlemine tabii tutularak elde edilen katı malzemesi, bitüm modifiye edici katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmıştır. Akmaz (2020) tarafından yapılan çalışmada, 1000gr polipropilen atığı hazırlanarak reaktör içine konulmuştur. Daha sonra cihazın kontrol biriminde; ilk sıcaklık 180°C olarak ayarlanmıştır. Deneyin başlaması ile, 20–25 dakika süresince sisteme Azot gazı akışı sağlanmıştır. Deney sistemin ulaştığı azami sıcaklık, göstergeden 330°C olarak okunmuştur ve ardından sıcaklık düşüşü ile deney sonlandırılmıştır. Deneyin sonucunda elde edilen kat ve sıvı malzeme verimi aşağıdaki bağlantılar yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\%Katı = \frac{Katı\ maddesi(gr)}{Toplam\ hammadde(gr)} \times 100 \implies \%Katı = 51,85$$

$$\%Sıvı = \frac{Sıvı\ maddesi(gr)}{Toplam\ hammadde(gr)} \times 100 \implies \%Sıvı = 32,4$$

$$\%Gaz = 100 - (\%Katı + \%Sıvı) \implies \%Gaz = 15,75$$

Deneyde elde edilen katı ve sıvı malzemesi Şekil 6.6'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Deney sonunda elde edilen katı ve sıvı malzemesi (Akmaz, 2020)

6.3. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye İşlemleri

Tez çalışma kapsamında üç farklı katkı maddesi, naylon poşet ve polipropilen pirolizi ile elde edilen katkı maddeleri ve SBS Kırıkkale Rafinerisi 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı ile modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bitüm bağlayıcı modifikasyonunda genel olarak üç faktör; sıcaklık, hız ve süre dikkate alınmaktadır. Literatür çalışmaları genel olarak incelendiğinde; plastiklerin bitüm bağlayıcı ile modifikasyon işlemlerinde ayarlanan sıcaklığın 160°C-180°C arasında olduğu görülmüştür.

Bitümlü bağlayıcıların uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü, bu durum sonucunda bitümde oksidasyon gerçekleşmektedir. Oksidasyon bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına yol açarak bozulmasına sebep olmaktadır (Dalhat ve Wahhab, 2017).

Daha önceki çalışmalara bakıldığında karıştırma hızı 1200-1300 rpm arası, karıştırma süresi 50-60 dakika arası seçildiği görülmüştür (Akmaz, 2020).

Dalhat ve Wahhab (2017) yaptıkları çalışmada, YYPE için en uygun karıştırma süresi 60 dakika, PP için en uygun karıştırma süresi 50 dakika olarak tespit edilmiştir.

Literatür araştırması yanı sıra, modifikasyon işlemine başlamadan önce katkıların fiziksel özelliklerine bakılmış ve erime sıcaklıkları 170°C civarında olduğu görülmüştür. Bu bilgilerin ışığında, modifikasyon işlemi boyunca sıcaklık 160°C-170°C tutulmuştur.

Sonuç olarak, Naylon poşeti pirolizi sonucunda elde edilen katkı maddesinden %3 ve %5 oranlarında, PP pirolizi ile elde edilen katkı maddesinden %5 oranında ve SBS katkı maddesinden %4,5 oranında, bitüm ağırlığına göre 50/70 penetrasyon dereceli

bitüm bağlayıcı ile karıştırılarak modifiye işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7. Bitüm modifiye mikseri gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Bitüm modifiye mikseri

6.4. Bitüm Deneyleri

Tez çalışma kapsamında Kırıkkale rafinerisinde üretilmiş 50/70 bitümü kullanılmıştır. Saf ve katkıli bitüm bağlayıcıların özelliklerini belirlemek amacıyla bazı deneylere tabi tutulmuştur. Saf bitüm, %3 (NPP) katkıli ve %5 (NPP) katkıli bitümlerin deney sonuçları Çizelge 6.8'den verilmiştir. Bu bitümlü bağlayıcılar Asfalt Betonu karışımının üretiminde kullanılmıştır.

Çizelge 6.8. Bitüm deney sonuçları

Deney	Saf Bitüm	%3NPP Katkıli Bitüm	%5NPP Katkıli Bitüm	Birim	Deney Standardı
Bitüm Özgül Ağırlığı	1,031	1,041	1,048	gr/cm ³	TS-EN 15326
Penetrasyon derecesi	53,5	47	41	0,1mm	TS-EN 1426
Yumuşuma noktası	51,5	56,5	61	°C	TS EN 1427

Ayrıca TMA karışımının üretiminde kullanılan PPP ve SBS katkıli bitümlü bağlayıcıların deneyleri Sultani (2021) tarafından yapılmıştır. Çizelge 6.9'de deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 6.9. PP ve SBS katkıli bitümlerin deney sonuçları (Sultani, 2021)

Deney	Saf Bitüm	%5PP Katkıli Bitüm	%4,5SBS Katkıli Bitüm	Birim	Deney Standardı
Bitüm Özgül Ağırlığı	1,031	1,037	1,041	gr/cm ³	TS-EN 15326
Penetrasyon derecesi	53,5	42,7	37,8	0,1mm	TS-EN 1426
Yumuşuma noktası	51,5	62	67	°C	TS EN 1427

6.5. Marshall Tasarımı ve Sonuçları

6.5.1. Asfalt betonu Marshall deney sonuçları

Asfalt Betonu karışımı için daha önceden belirlenmiş agrega gradasyonuna göre 1150gr ağırlığında agrega, her bitüm için %3.5, %4, %4.5, %5, %5.5 ve %6 oranları seçilerek her bitüm oranı için 3'er numune olmak üzere toplam 18 adet numune üretilmiştir.

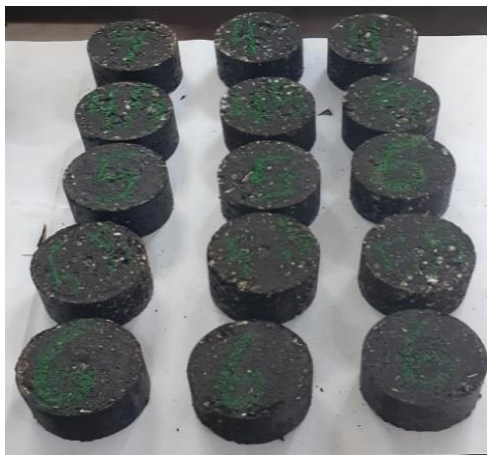
Laboratuvarda Marshall tasarımı için ilk başta numeneler (%4, %4.5,%5, %5.5, %6) bitüm oranları ile üretilmiştir. Daha sonra %3.5 bitümü ile de numene üretimi gereksinimi duyulmuştur. Şekil 6.8'de Marshall BSK numuneleri gösterilmiştir.



(a) Katkısız bitümle hazırlanmış numuneler



(b) %3 NPP ile hazırlanmış numuneler



(c) %5 NPP ile hazırlanmış numuneler



(d) %3.5 saf bitüm oranı ile hazırlanmış numuneler

Şekil 6.8. Marshall tasarımı için hazırlanmış numuneler

Tasarım boyunca numunelere yapılan tüm deneyler sonucunda elde edilen veriler, Marshall çizelgesine yazılmıştır. Daha sonra bu verilere dayanarak tez metnin "5.2.4" konu başlığı altında verilen formüller kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Aynı

bitüm oranındaki numunelere ait değerlerin ortalaması alınarak bitüm oranına karşılık, hacim özgül ağırlık (Dp), boşluk (Vh), bitüm ile dolu boşluk (Vf), agregalar arası boşluk (VMA), akma ve stabilite grafikleri çizilmiştir.

Saf, %3 NPP ve %5 NPP Marshall tasarımı deney sonuçlarına dayanarak çizilen grafikler sırasıyla Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11’de gösterilmiştir. Ayrıca Marshall tasarımı grafik değerleri saf, %3 NPP ve %5 NPP için sırasıyla Çizelge 6.10, 6.11 ve 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.10. Saf bitümle hazırlanmış numunelerin Marshall tasarım sonuçları

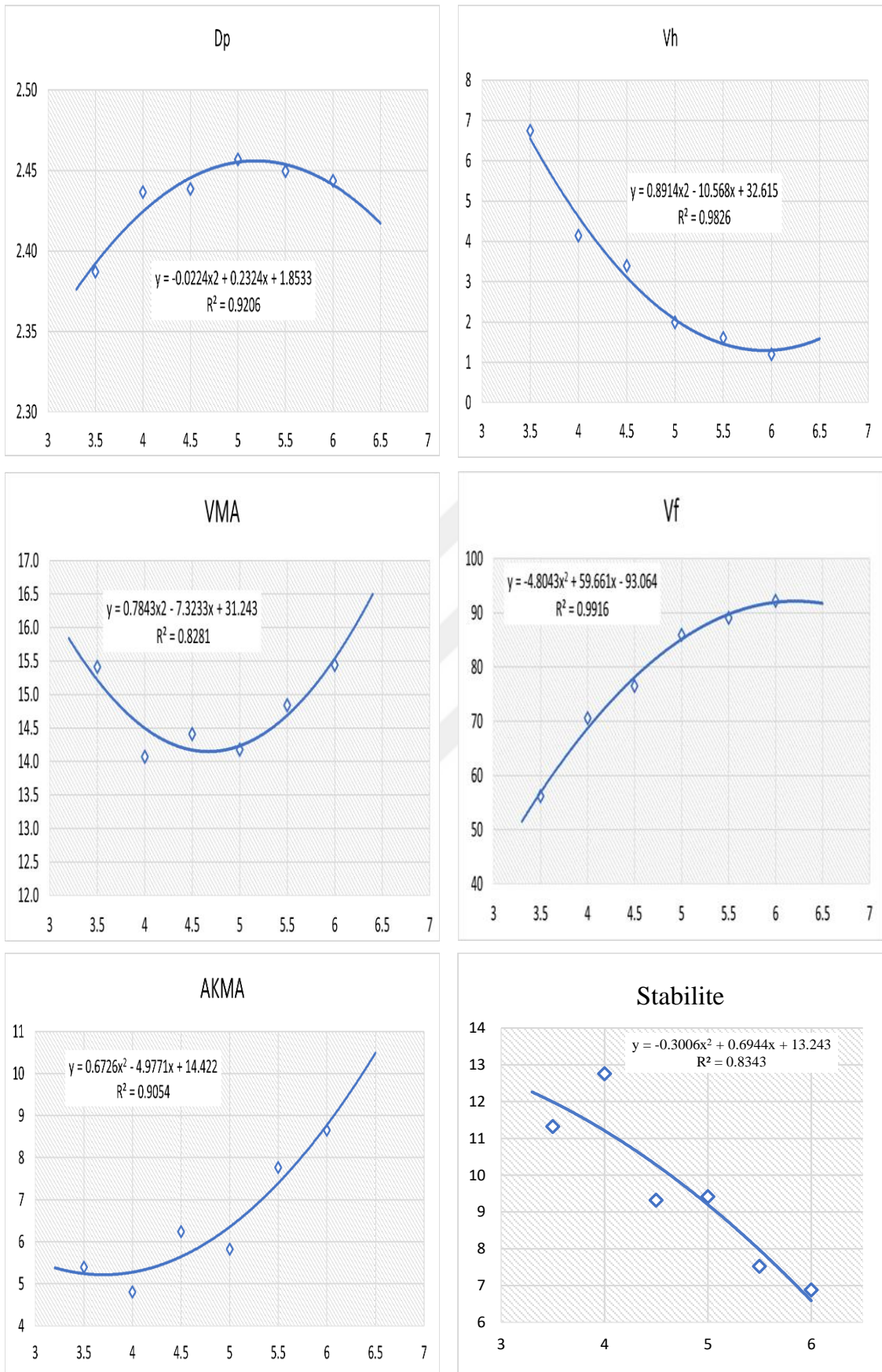
Bitüm içeriği Wb (%)	Dp (gr/cm ³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stabilite (kn)
3.5	2.387	6.75	15.41	56.19	5.40	11.33
4	2.436	4.14	14.07	70.57	4.81	12.76
4.5	2.439	3.39	14.41	76.49	6.24	9.32
5	2.457	1.99	14.18	85.94	5.82	9.42
5.5	2.450	1.61	14.84	89.12	7.77	7.53
6	2.444	1.20	15.44	92.24	8.65	6.88

Çizelge 6.11. %3 NPP katkılı bitümle hazırlanmış numunelerin Marshall tasarım sonuçları

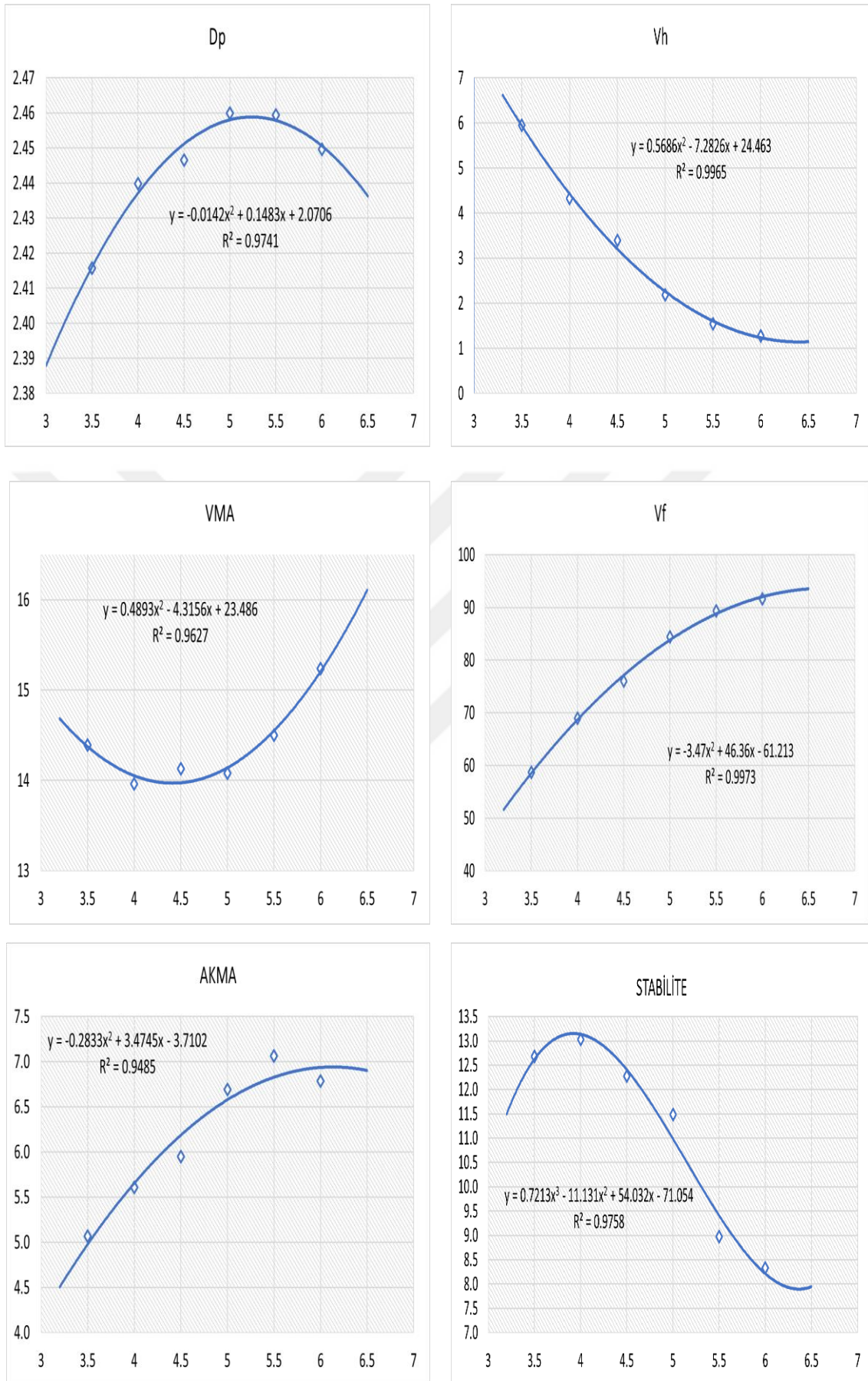
Bitüm içeriği Wb (%)	Dp (gr/cm ³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stabilite (kn)
3.5	2.416	5.95	14.39	58.67	5.07	12.68
4	2.440	4.33	13.96	68.96	5.61	13.03
4.5	2.447	3.39	14.13	76.01	5.95	12.27
5	2.460	2.19	14.08	84.43	6.69	11.49
5.5	2.459	1.54	14.50	89.36	7.06	8.98
6	2.450	1.28	15.24	91.63	6.79	8.34

Çizelge 6.12. %5 NPP katkılı bitümle hazırlanmış numunelerin Marshall tasarım sonuçları

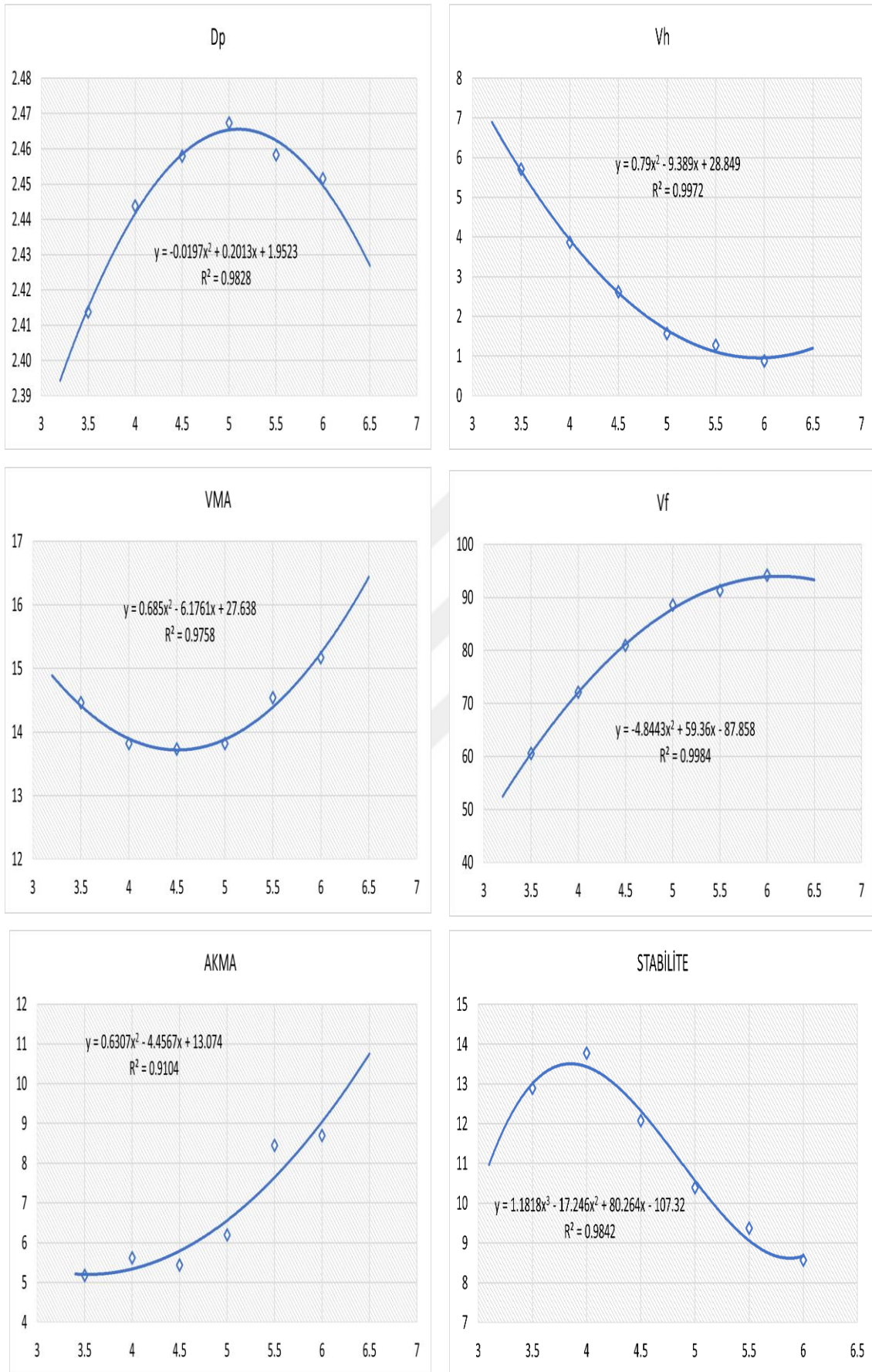
Bitüm içeriği Wb (%)	Dp (gr/cm ³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stabilite (kn)
3.5	2.414	5.71	14.46	60.54	5.18	12.90
4	2.444	3.86	13.82	72.10	5.61	13.78
4.5	2.458	2.62	13.73	80.91	5.44	12.07
5	2.467	1.57	13.82	88.60	6.19	10.39
5.5	2.458	1.27	14.54	91.28	8.45	9.37
6	2.452	0.88	15.17	94.18	8.70	8.57



Şekil 6.9. Saf bitüm Marshall deney grafikleri



Şekil 6.10. %3 NPP katkılı bitüm Marshall deney grafikleri



Şekil 6.11.%5 NPP katkılı Marshall deney grafikleri

6.5.1.1. Optimum bitüm oranların belirlenmesi

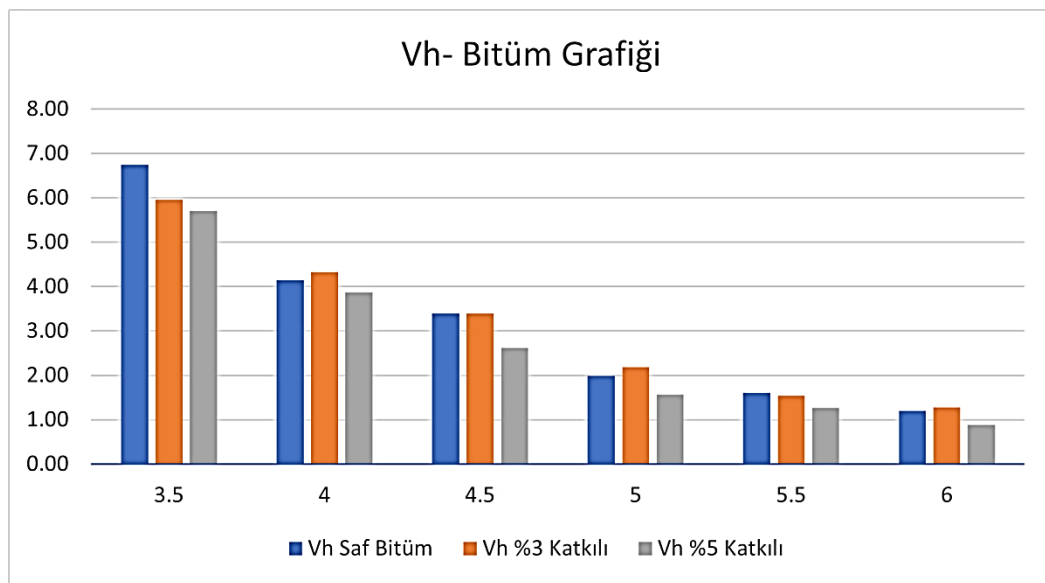
Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11’de çizilen grafiklerde; maksimum hacim özgül ağırlık (Dp), maksimum stabilite, %4 boşluk (Vh) ve %70 bitümle dolu boşluk (Vf) oranlarına karşılık gelen bitüm oranları her 3 karışım için tespit edilmiştir. Daha sonra her bir karışım için (saf, %3NPP ve %5NPP) bu değerlerin ortalaması alınarak optimum bitüm oranları hesaplanmıştır. AB karışımı için optimum bitüm oranları Çizelge 6.13’te verilmiştir.

Çizelge 6.13. AB karışımı için optimum bitüm oranları

Tasarım Parametresi	Optimum Bitüm Şartı	Saf Bitüm için	%3NPP Katkılı Bitüm için	%5NPP Katkılı Bitüm için
Dp (gr/cm ³)	Maksimum değerine karşılık gelen	5.19	5.22	5.10
Stabilite (KN)	Maksimum değerine karşılık gelen	4.00	3.92	4.00
Vh (%)	%4 değerine karşılık gelen	4.19	3.83	3.83
Vf (%)	%70 değerine karşılık gelen	4.13	4.03	3.90
Optimum Bitüm Oranı (%)	Ortalama Değer	4.40	4.26	4.21

Karışımların boşluk yüzdesi

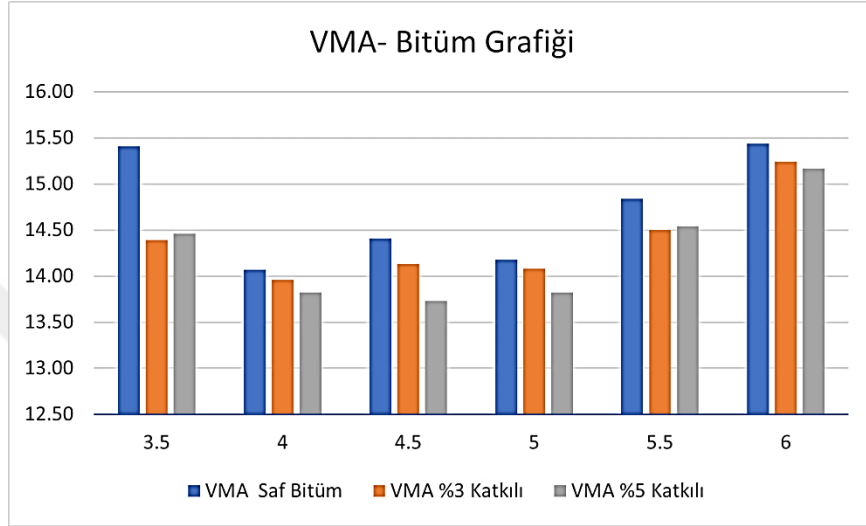
Boşluk oranı ve bitüm yüzdesi grafiğinde, boşluk oranının şartnamede belirlenen sınırlar (%3-%5) içinde kaldığı görülmüştür ve bu değerler yaklaşık olarak %4 bitüm oranlarına denk geldiği gözlemlenmektedir. Bütün numunelerde bitüm oranının artmasıyla birlikte hava boşluğunun azaldığı Şekil 6.12’de görülmektedir.



Şekil 6.12. Karışımların boşluk yüzdesi

Agregalar Arası Boşluk Oranı (VMA)

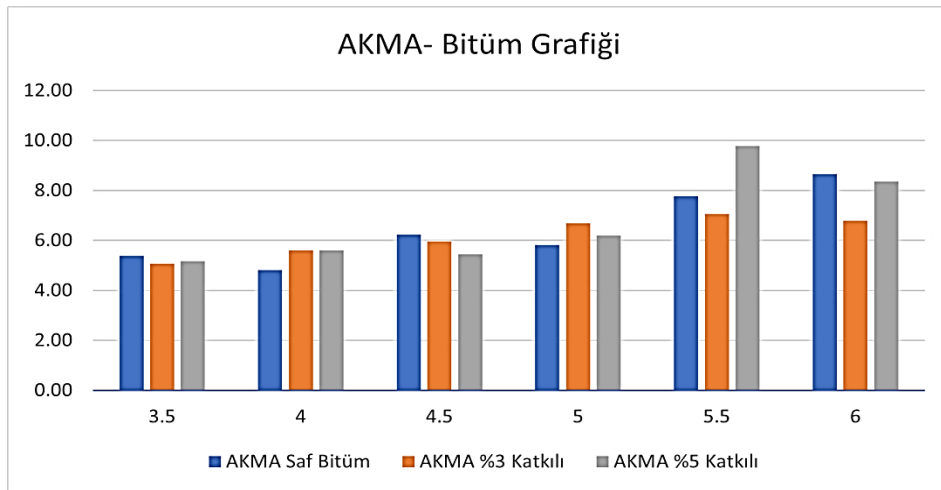
VMA oranı yüksek olduğu durumlarda agrega danelerinin bitümlü bağlayıcı maddenin içerisinde yüzme tehlikesi olabilmektedir. Bu durumda taşıyıcı iskelet dağılarak kaplamanın taşıyıcılık özelliği ortadan kalkmaktadır. Asfalt Betonu karışımları için şartname sınırları %14-%16 arasındadır. Şekil 6.13'te VMA- Bitüm Grafiği görülmektedir.



Şekil 6.13. Karışımın VMA yüzdesi

Karışımların Akma Değerleri

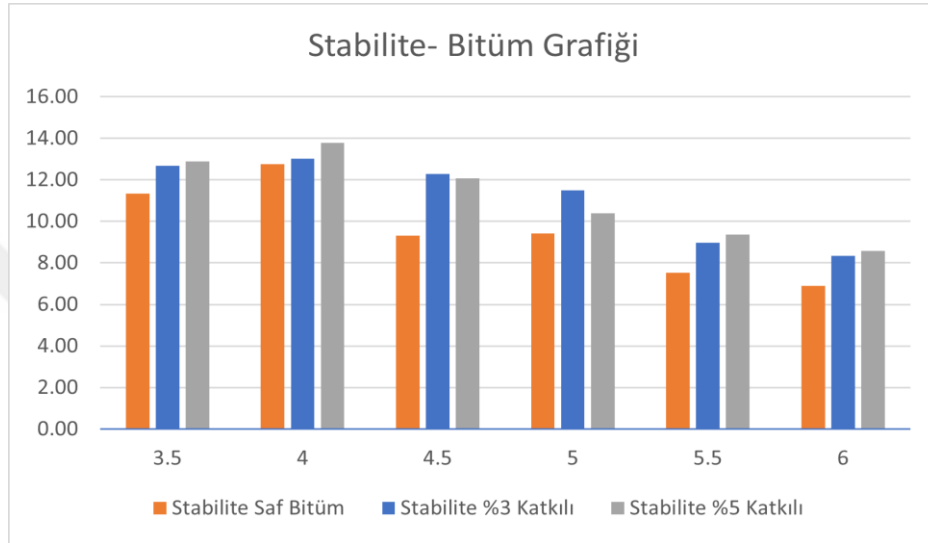
Akma, bir numunenin maksimum yük altında uğradığı deformasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6.14'te bitüm ve akma arasındaki ilişki görülmektedir. Grafiğe bakıldığımızda bitüm miktarı artmasıyla akma değeri de artmaktadır.



Şekil 6.14. Karışımların Akma grafiği

Karışımların Stabilite Değerleri

Stabilite, numunenin yük altında deformasyona karışı gösterdiği maksimum direnç değeri temsil etmektedir. Şekil 6.15'te bitüm içeriği ve stabilite değeri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Grafiğe baktığımızda bitüm içeriğinin artmasıyla birlikte stabilite değeri de artmıştır. Daha sonra bitüm içeriğinin artmasıyla stabilite değerinde azalma görülmüştür.



Şekil 6.15. Karışımların stabilite grafiği

6.5.2. TMA Marshall deney sonuçları

Sultani (2021), tarafından yapılan çalışmada toplamda 54 adet numune 1150g agrega ağırlığında, farklı bitüm oranları ve farklı modifiye edici katkı maddeleri kullanılarak üretilmiştir. Bitüm oranları sırasıyla %5, %5,5, %6, %6,5, %7, %7,5 olarak belirlenmiş ve her bitüm oranına 3'er adet numune olacak bir biçimde toplamda 18 adet numune üretilmiştir. Numunelerin hepsi 160°C karışım sıcaklığında hazırlanmıştır. Modifiye edici katkı maddesi olarak karışım ağırlığına göre %0,5 elyaf ve bitüm bağlayıcı ağırlığına göre %4,5 SBS ve %5 PPP kullanılmıştır.

TMA karışımlarda Marshall metoduna göre numenin her yüzeyine 50 vuruş yapılmıştır ve tasarım sonuçlarına dayanarak her bitüm oranına göre optimum bitüm miktarları hesaplanmıştır. Saf bitüm için optimum bitüm oranı %6,2, %5 PPP ile modifiye edilmiş bitüm için optimum bitüm oranı %6,3 ve %4,5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm için optimum bitüm oranı %6,6 olarak hesaplanmıştır.

6.6. Gyrator sıkıştırma makinesi ve sonuçları

6.6.1. Asfalt betonu GSM deney sonuçları

Asfalt Betonlu karışımı için daha önceden belirlenmiş agrega gradasyonuna göre 4700gr ağırlığında agrega, Marshall deneyi sonucundan elde edilen optimum bitüm oranı, optimum bitüm oranına 0,5 oranında bitüm ekleyerek ve 0,5 oranında bitüm çıkartarak, her karışım tipi için 3'er adet numune (Optimum, optimum+0,5 ve optimum-0,5) olmak üzere numune hazırlanmıştır. Böylelikle 3 tip karışım için (Saf, %3NPP ve %5NPP) toplam 9 adet numune 155°C sıcaklıkta karıştırılarak ve 145°C sıcaklıkta sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Şekil 6.16'de GSM cihazında üretilen numuneler gösterilmiştir.



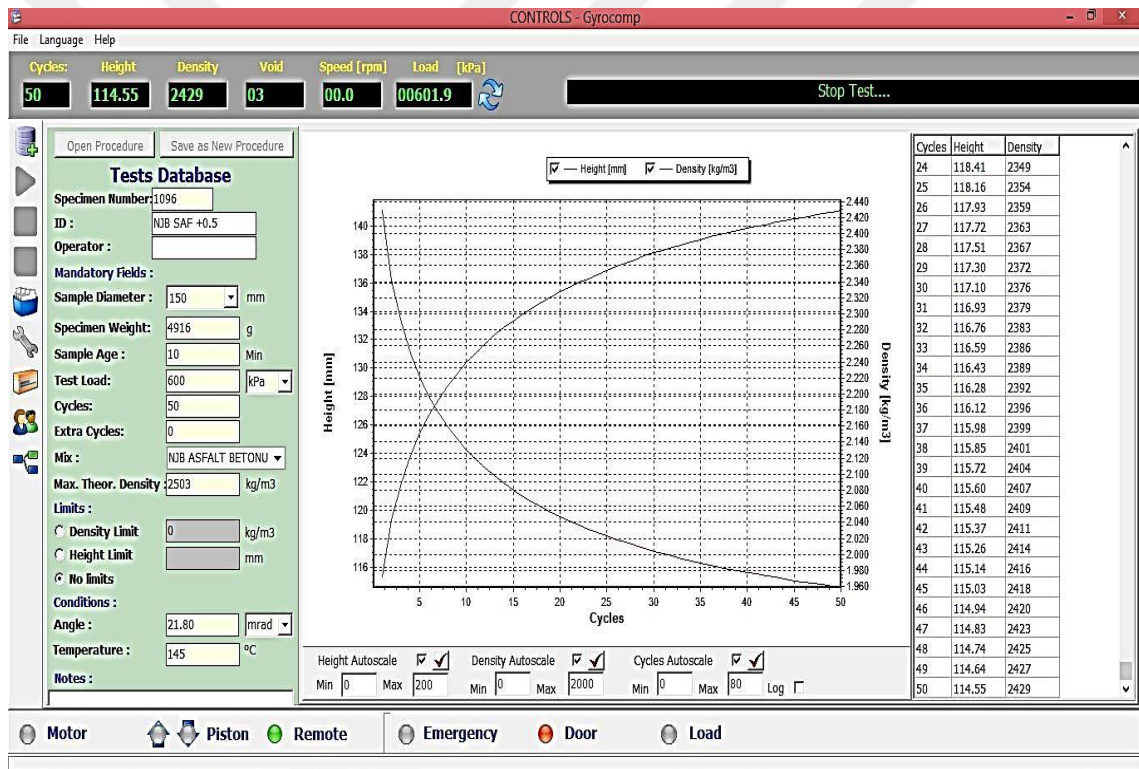
Şekil 6.16. GSM cihazında hazırlanmış numuneler

Deney sırasında bilgisayarda deney ile alakalı bazı parametreleri girmemiz gerekiyor ve bu verilerde en ufak bir hata sonucunda deney sonuçları yanlış çıkabiliyor. Bu çalışma kapsamında bütün numuneler 50 devirde (Tekerlek izi deneyi için istenilen

boşluk oranın sağlamak için 50 devirde sıkıştırılmıştır) sıkıştırılmıştır ve özellikleri şunlardır.


- Numunenin çapı 150 mm olarak seçilmiştir.
- Her numunenin ağırlığı tartılarak deneyden önce girilmiştir.
- Deneyde dikey basınç 600 kpa olarak seçilmiştir.
- Bütün numuneler 50 devirde sıkıştırılmıştır.
- Dönme açısı 21,80 mrad (1.25 ± 0.02)° olarak seçilmiştir.
- Bütün numuneler 145°C sıcaklıkta sıkıştırılmıştır.

Şekil 6.17’de deney sırasında bilgisayar ekranında aktarılan sonuçlar gösterilmiştir. Ekranın sol tarafında deney özellikleri ve ekranı sağ tarafında deney sonuçları yer almaktadır.



Şekil 6.17. Deney sırasında bilgisayara aktarılan sonuçlar

Deney bittikten sonra, deney sonuçları kaydedilir. Bu deneyde karışımla alakalı bütün özellikler bilgisayar tarafından otomatik bir şekilde hesaplanmaktadır. Her devire karşılık gelen karışımın; yüksekliği, boşluk oranı, yoğunluğu, VMA, VFB ve teorik özgül ağırlığı bilgisayar tarafından kolaylıkla hesaplanmaktadır. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’de %5NPP katkılı karışımın deney sonuçları gösterilmiştir.



CONTROLS Your Partners

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

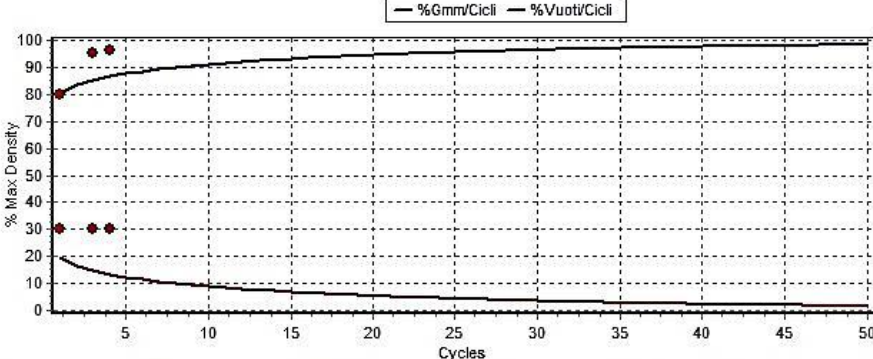
Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Mix Specifications	Weight	Specific Gravity	Identification		
	[%]	[kg/m ³]	Date :	12.10.202	
Aggregate:	93.5	2700.0	Specimen Number:	1091	
		Gsb	ID :	NJB +0,5,	
			Mix :	NJB ASFALT BETONU	
Filler: KALKAR	6.5	2740.0	Test Parameters		
Bitumen: 50/70	4.7	1048.0	Specimen Weight	4905	g
			Age :	10	Min
			Final Height	112.37	mm
Maximum Theoretical Density Gmm, (kg/m ³)		2515	Test Duration :	50	Cycles
Bitumen content, % volume		11.3	Gyratory Angle:	21.800	mrad
			Vertical Pressure:	600	kPa
			Test Temperature:	145	°C
			Rotation Speed:	29.7	rpm

Results :

	Criterium	Gmm		%Gmm
		Min	Max	
N Init :	1	30.0	80.0	80.4
N Design :	3	30.0	95.0	85.0
N Max :	4	30.0	96.0	86.4




ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
50	112.4	2470	1.8	12.8	85.8	98.2

The Technician:

The Manager:

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Şekil 6.18. GSM tasarım deneyin sonucunda elde edilen sonuç

						
Masters of Technology						
Single Test diam. 150 mm						
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	141.0	1963	22.5	30.3	25.7	77.5
2	136.4	2029	19.9	28.0	28.8	80.1
3	133.6	2072	18.3	26.5	31.1	81.7
4	131.5	2104	17.0	25.3	33.0	83.0
5	129.9	2130	16.0	24.4	34.7	84.0
6	128.6	2151	15.1	23.7	36.1	84.9
7	127.6	2170	14.4	23.0	37.5	85.6
8	126.6	2186	13.8	22.4	38.7	86.2
9	125.8	2200	13.2	21.9	39.9	86.8
10	125.0	2213	12.7	21.5	41.0	87.3
11	124.4	2225	12.2	21.1	42.0	87.8
12	123.8	2235	11.8	20.7	43.0	88.2
13	123.3	2245	11.4	20.3	43.9	88.6
14	122.8	2254	11.1	20.0	44.8	88.9
15	122.3	2262	10.7	19.7	45.6	89.3
16	121.9	2270	10.4	19.4	46.4	89.6
17	121.5	2278	10.1	19.2	47.2	89.9
18	121.1	2285	9.9	18.9	47.9	90.1
19	120.8	2291	9.6	18.7	48.7	90.4
20	120.5	2297	9.4	18.5	49.3	90.6
21	120.2	2303	9.1	18.3	50.0	90.9
22	119.9	2308	8.9	18.1	50.7	91.1
23	119.6	2313	8.7	17.9	51.3	91.3
24	119.4	2318	8.5	17.8	51.9	91.5
25	119.1	2323	8.3	17.6	52.5	91.7
26	118.9	2327	8.2	17.4	53.1	91.8
27	118.7	2331	8.0	17.3	53.6	92.0
28	118.5	2336	7.8	17.1	54.2	92.2
29	118.3	2340	7.7	17.0	54.8	92.3
30	118.1	2344	7.5	16.8	55.3	92.5
31	117.9	2347	7.4	16.7	55.8	92.6
32	117.7	2351	7.3	16.6	56.3	92.7
33	117.6	2354	7.1	16.5	56.8	92.9
34	117.4	2357	7.0	16.4	57.3	93.0
35	117.2	2361	6.9	16.2	57.8	93.1
36	117.1	2364	6.7	16.1	58.2	93.3
37	116.9	2366	6.6	16.0	58.6	93.4
38	116.8	2369	6.5	15.9	59.1	93.5
39	116.7	2372	6.4	15.8	59.5	93.6
40	116.5	2375	6.3	15.7	59.9	93.7
41	116.4	2377	6.2	15.7	60.3	93.8
42	116.3	2380	6.1	15.6	60.7	93.9
43	116.2	2382	6.0	15.5	61.2	94.0
44	116.1	2385	5.9	15.4	61.6	94.1
45	116.0	2387	5.8	15.3	61.9	94.2
46	115.8	2389	5.7	15.2	62.3	94.3
47	115.7	2391	5.7	15.2	62.6	94.3
48	115.6	2393	5.6	15.1	63.0	94.4
49	115.6	2395	5.5	15.0	63.3	94.5
50	115.5	2397	5.4	15.0	63.7	94.6

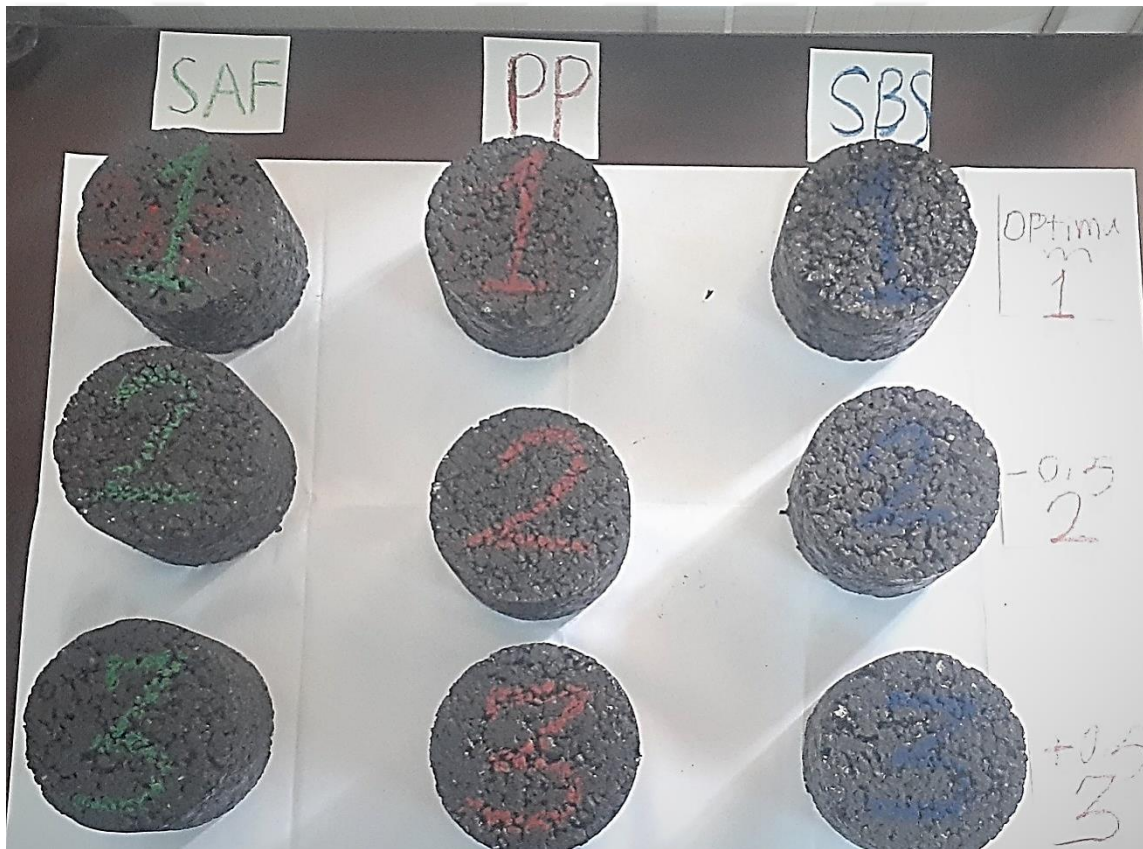
Date : _____
Technician : _____
Project : _____

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Şekil 6.19. GSM tasarım deneyi sonucunda elde edilen sonuç

6.6.2. Taş mastik asfalt GSM deney sonuçları

TMA karışımı için daha önceden belirlenmiş agrega gradasyonuna göre 4700gr ağırlığında agrega, Marshall deneyi sonucundan elde edilen optimum bitüm oranı, optimum bitüm oranına 0,5 oranında bitüm ekleyerek ve 0,5 oranında bitüm çıkartarak, her karışım tipi için 3'er adet numune (Optimum, optimum+0,5 ve optimum-0,5) olmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Böylelikle 3 tip karışım için (Saf, %5PP katkılı ve %4,5SBS katkılı) toplam 9 adet numune 155°C sıcaklıkta karıştırılarak ve 145 °C sıcaklıkta sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu üç karışımında, karışım ağırlığına göre %0,5 elyaf maddesi kullanılmıştır. Şekil 6.20'de GSM cihazında üretilen numuneler gösterilmiştir.



Şekil 6.20. GSM cihazı ile üretilen TMA numuneleri

6.6.3. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirlik hesabı

Cabrera (1991), bitümlü karışımların işlenebilirliğini, karışımın boşluk oranının tersi olarak tanımlanmıştır. Yaptığı çalışmada numuneleri 0,7MPa aksenal bir yük altında, 30 devirde sıkıştırılmıştır. Her 5 devirden sonra numune yükseklikleri ölçülmüştür. Daha sonra numuneler kalıptan çıkartıldıktan ve soğutulduktan sonra

ağırlıkları tartılmıştır. Ağırlık ve yükseklik bilgileri kullanılarak Porozite değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra her devirdeki Porozite değerinin tersi, o devirdeki “işlenebilirlik indeksi” (workability index, WI) olarak adlandırılmıştır. Bir karışımın İşlenebilirlik indeksi değerinin küçük olması, karışımın sıkışmasının daha zor olduğunu göstermektedir. Yapılan arazi çalışmaları, İşlenebilirlik indeksi 6’dan küçük olduğu zaman, karışımların sıkıştırılması sırasında zorluklar ile karşılaşmıştır. İşlenebilirlik indeksi (WI) 4.1 bağlantı yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$WI = (1/A)*100 \quad (6.1)$$

Asfalt Beton Karışımın İşlenebilirlik Sonuçları

Bu tez çalışma kapsamında, karışımların işlenebilirliği 30 ve 50’nci devirde elde edilen sonuçlara göre hesaplanmıştır. Çizelge 6.14, 6.15 ve 6.16’te sırası ile katkısız, %3NPP ve %5NPP katkılı bitümlerle hazırlanmış numunelerin 30’ncü ve 50’nci devirdeki boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi gösterilmiştir. Daha sonra bu sonuçlara dayanarak WI - bitüm içeriği grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 6.14. Katkısız bitümle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

Katkısız	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	3.9	8.5	11.76	6.3	15.87
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	4.4	8	12.50	5.1	19.61
OBİ+0,5	4.9	5.1	19.61	3	33.33

Çizelge 6.15. %3NPP katkılı bitümle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

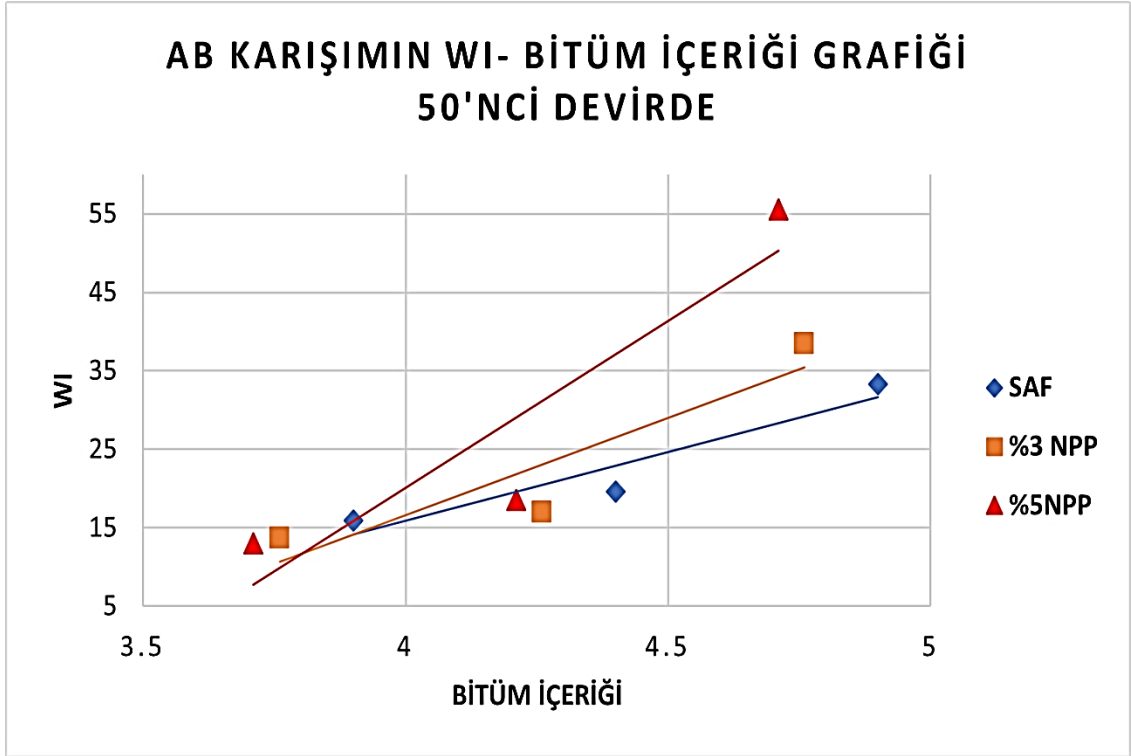
%3NPP	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	3.76	9.5	10.53	7.3	13.70
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	4.26	8.1	12.35	5.9	16.95
OBİ+0,5	4.76	4.3	23.26	2.6	38.46

Çizelge 6.16. %5NPP katkılı bitümle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

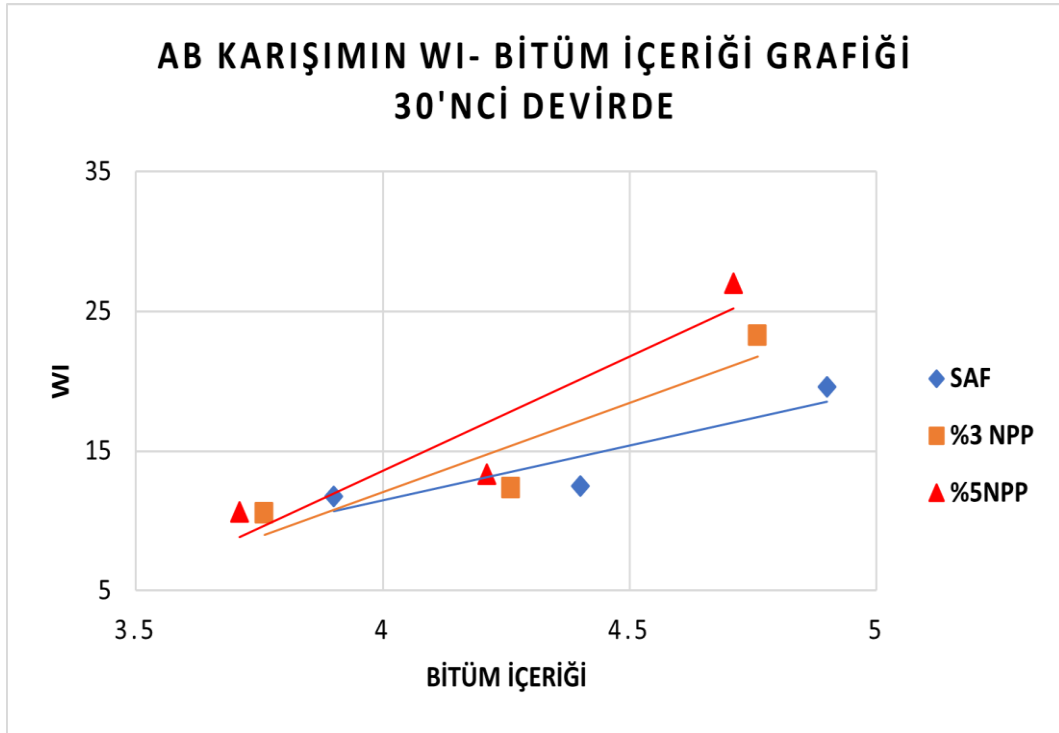
%5NPP	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	3.71	9.4	10.64	7.7	12.99
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	4.21	7.5	13.33	5.4	18.52
OBİ+0,5	4.71	3.7	27.03	1.8	55.56

Asfalt betonu karışımın, işlenebilirlik indeksi – bitüm içeriği grafiği Çizelge 6.14, 6.15 ve 6.16’ya göre çizilerek Şekil 6.21 ve 6.22’de gösterilmiştir.

Genel olarak bir karışımın işlenebilirliği sıcaklık ve bitüm içeriğinin artması ile iyileştirilebilir. Aşağıdaki grafiklere baktığımızda, katkı oranı arttıkça işlenebilirlik oranı gözle görülebilir bir şekilde artmıştır.



Şekil 6.21. AB karışımın WI – Bitüm içeriği grafiği 50'nci devirde



Şekil 6.22. AB karışımın WI – Bitüm içeriği grafiği 30'nci devirde

TMA Karışımın İşlenebilirlik Sonuçları

Bu tez çalışma kapsamında, karışımların işlenebilirlik indeksi 30 ve 50'nci devirde elde edilen sonuçlara göre hesaplanmıştır. Çizelge 6.17, 6.18 ve 6.19'de sırası ile katkısız, %5PP ve %4.5SBS katkılı bitümlerle hazırlanmış numunelerin 30'ncü ve 50'nci devirdeki boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi gösterilmiştir. Daha sonra bu sonuçlara dayanarak WI - bitüm içeriği grafikleri çizilmiştir.

Çizelge6.17. Katkısız bitümlerle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

Katkısız	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	5.7	11.80	8.47	9.47	10.56
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	6.2	8.50	11.76	6.10	16.39
OBİ+0,5	6.7	7.70	12.99	5.30	18.86

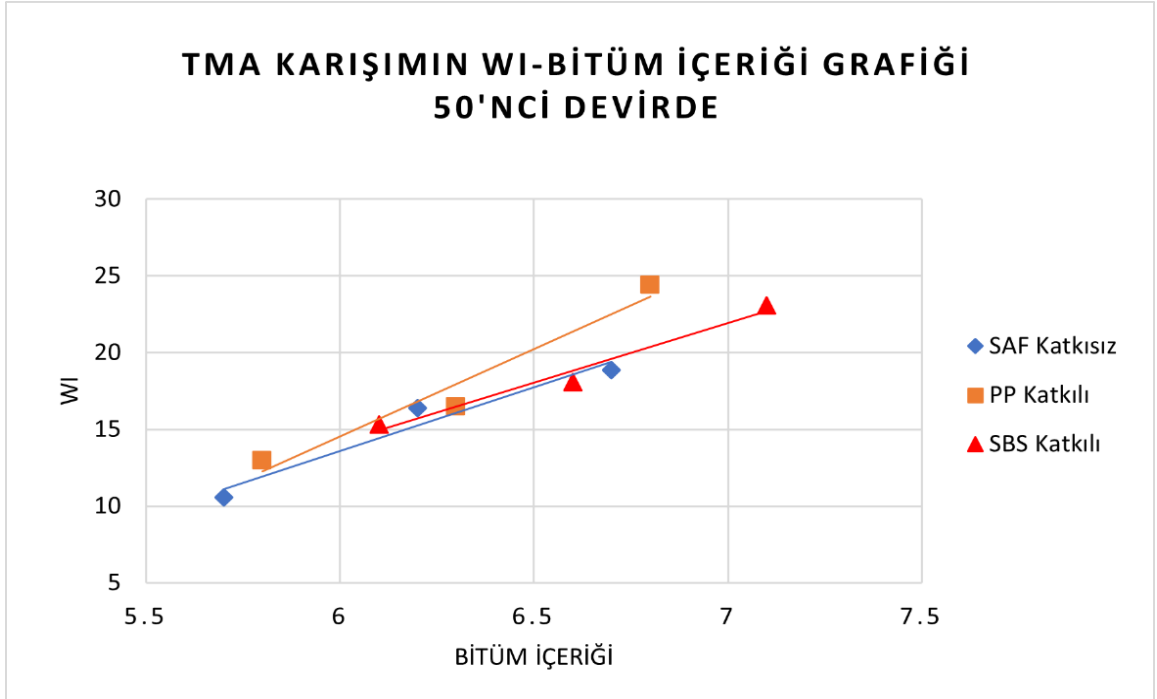
Çizelge 6.18. %5PP katkılı bitümlerle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

%5PP	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	5.8	10.10	9.90	7.71	12.97
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	6.3	8.4	11.90	6.07	16.47
OBİ+0,5	6.8	6.60	15.15	4.10	24.38

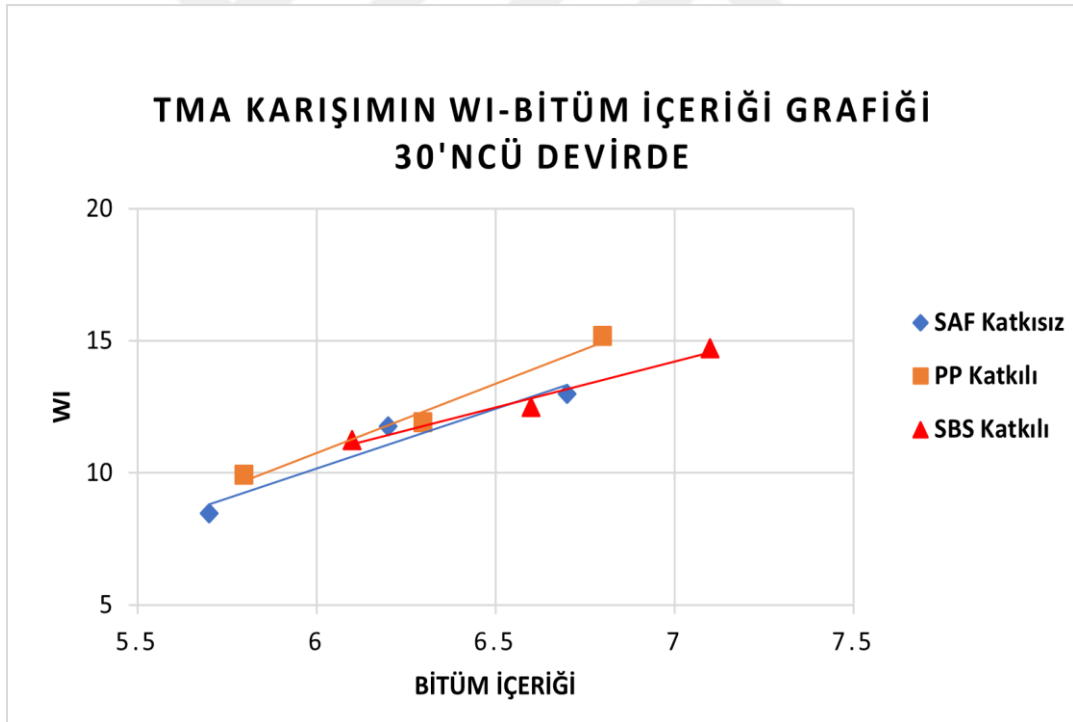
Çizelge 6.19. %4,5SBS katkılı bitümlerle hazırlanmış numunelerin boşluk oranı ve işlenebilirlik indeksi

%4.5SBS	Bitüm İçeriği	Boşluk Oranı (30)	WI (30)	Boşluk Oranı (50)	WI (50)
OBİ-0,5	6.1	8.90	11.24	6.53	15.31
Optimum Bitüm İçeriği (OBİ)	6.6	8.00	12.50	5.53	18.07
OBİ+0,5	7.1	6.80	14.71	4.33	23.09

Asfalt betonu karışımın, işlenebilirlik indeksi – bitüm içeriği grafiği Çizelge 6.17, 6.18 ve 6.19'e göre çizilerek Şekil 6.23 ve 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23. TMA karışımın WI – Bitüm içeriği grafiği 50'nci devirde



Şekil 6.24. TMA karışımın WI – Bitüm içeriği grafiği 30'uncu devirde

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karayolu üstyapı inşaatında kullanılan bitümlü sıcak karışımların hizmet ömürleri boyunca iyi performans göstermeleri ve kaliteli bir üretim yapabilecek işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar serme ve sıkıştırma aşamalarına geçmeden önce laboratuvarında işlenebilirliği belirlenmelidir.

Bu tez çalışma kapsamında, naylon poşet pirolizi sonucunda elde edilen katkı maddesi ilave edilerek asfalt betonu ve polipropilen pirolizi sonucunda elde edilen katkı maddesi ve SBS katkı maddesi ilave edilerek TMA karışımları üretilmiştir. Daha sonra bu katkı maddelerin, karışımların işlenebilirliği üzerinde etkileri araştırılmıştır.

7.1. Asfalt Betonu Karışımın Marshall Sonuçları

- Kısmi da olsa, katkı oranı artıkça optimum bitüm içeriğinde bir azalama meydana gelmiştir. Saf OBİ > %3NPP OBİ >%5NPP OBİ aralarında böyle bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Katkının kullanımı bitüm kullanım oranını azalmıştır.
- Bitümlü karışımlarda taş iskelet bitümlü bağlayıcı yardımı ile bir arada tutmakta ve üstyapıdan gelen yükler taş iskelet tarafından karışlanmaktadır. Agregalar arası boşluk bir kısmı bitümlü bağlayıcı tarafından doldurulur ve geri kalan kısmında hava boşluğu kalır. Hava boşluğu olmalıdır ve KTŞ'e göre (%3-%5) arasındadır. Yapılan çalışmada bitüm oranı artıkça agregalar arasında boşluk oranı azalmıştır. OBİ hariç yaklaşık bütün bitüm oranlarında şartname sınırları arasında olmadığı görülmüştür.
- VMA değerleri KTŞ'e göre (%14-%16) arasında olması gerekir. Katkısız bitümlü bağlayıcı oluşturan karışımlarda VMA değerleri yüksek ve şartname sınırları içindedir ama %5NPP ile oluşturan numunelerde VMA değerleri düşük ve çoğu bitüm oranlarında şartname sınırları içerisinde değildir.
- Akma; maksimum yük altında briketlerin uğramış olduğu deformasyon oranıdır. Çalışmada bitüm içeriği artıkça akma değerleri genel olarak artmıştır.
- Katkılı bitümlerle hazırlanmış numunelerin saf bitümle hazırlanmış numunelere nazaran stabilite değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür.

7.2. AB ve TMA Karışımların İşlenebilirlik Sonuçları

- ✓ Genel olarak bir karışımın işlenebilirliğini iyileştirmek için, sıcaklık ve bitüm içeriğini artırmakla mümkün ama bitümlü bağlayıcının aşırı yaşlanması, modifiye katkıların yapısının bozulması, enerji tüketiminin artması, aşırı duman ve zararlı gazların ortaya çıkması gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında üretilen bütün numuneler aynı sıcaklıkta (145°C) sıkıştırılmaya tabi tutulmuştur. Asfalt betonu karışımında OBİ birbirine çok yakın olduğu halde katkı oranı arttıkça, işlenebilirlik indeksi o kadar artmıştır. Özellikle bu farkı (OBİ+0,5) bitüm oranında sıkıştırılan numunelerde rahatlıkla görebiliriz. Bu sonuçlara dayanarak NPP maddesi işlenebilirliği iyileştirecek katkı maddesi olarak kullanılabilir.
- ✓ TMA karışımında, %5PP ve %4,5SBS katkı maddelerin OBİ oranları birbirine yakın olmadığı halde, SBS katkısı ile üretilen numunelerin PP katkı maddesi ile üretilen numunelere nazaran bitüm oranı fazla olduğu halde, %5PP ile hazırlanmış numunelerin daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak polipropilen maddesinin işlenebilirliğe etkisi olduğu ve SBS katkı maddesinin işlenebilirliğe etkisi olmadığı sonucuna varmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda, katkılı bitümlerin saf bitüme göre daha düşük penetrasyon derecelerine ve daha yüksek yumuşama noktalarına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, katkılı karışımların daha yüksek stabilite ve akma değerlerine sahip olduğu, boşluk oranının düştüğü gözlemlenmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, literatürde yapılan çalışmaları desteklemektedir.

Yapılan literatür çalışmalarına göre, atık plastiklerin karışımların işlenebilirliği üzerinde pozitif bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, literatürde yapılan çalışmaları desteklemektedir.

%4,5SBS katkı maddesi ile üretilen karışımların işlenebilirlik indeksi, saf bitüme göre daha yüksektir. Bu durumun nedeni, %4,5SBS katkı maddesi ile hazırlanan numunelerin bitüm içeriğinin saf numunelere göre daha yüksek olmasıdır. Bitüm içeriği arttıkça bir karışımın işlenebilirliği genellikle artar.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M., Ahmad, N., Jaya, R., & Hassan, N. (2017). Effects of Waste Plastic on the Physical and Rheological Properties of Bitumen. *Materials Science and Engineering*.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M. (2011). *Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt*. Materials and Design.
- Akmaz, M. M. (2020). *Farklı Plastik Atıkların Birlikte Pirolizinden Elde Edilen Katı Ürünle Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması*. Konya: Doktora Tezi.
- Al-Hadidy, A., & Yi-qiu, T. (2011). *The Effect of Plastomers Polymer Type and Concentration on Asphalt and Moisture Damage of SMA Mixtures*. Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ), Volume 19, Issue 5, Pages 1-11.
- Al-Hadidy, A., & Rahim, A. (2006). *Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Paving Materials*. Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ), Volume 14, Issue 2, Pages 36-50.
- Alp, B. (2018). *Aşınma asfalt betonu ve taş mastik asfalt tekniğinin köprü uygulamalarında kullanılması ve karşılaştırılması*. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi.
- Altan, F. (2018). *Taş Mastik Asfaltta Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması Ve Doğal Agrega İle Karşılaştırılması*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Amin, M., Khan, M., & Saleem, M. (2016). *Performance Evaluation of Asphalt Modified with Municipal Wastes for Sustainable Pavement Construction*. Saudi Arabia: King Faisal University, Sustainable Engineering and Science.
- Anonymous. (1989). *Asphalt Institute. The Asphalt Handbook*.
- Anonymous. (2010). *Laoratory Mixing and Compaction Temperatures*. Asphalt Institute.
- Appiah, J., Berko-Boateng, V., & Tagbor, A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*.
- Arıkan, A. (2007). *Sert plastik ambalajlar*. İstanbul: Ambalaj sanayicileri derneği iktisadi işletmesi.
- Arslan, D. (2010). *Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal ve Polibor Katkı Maddeleriyle Geliştirmesi*. Doktora Tezi.
- Arslan, F. (2014). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda İstanbul Çevresindeki Cebeci Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük-Kumtaşı ve Karatepe-Bazaltı Kullanımının İncelenmesi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ASTMD6927-15. (2015). *Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures*.
- Awwad, M., & Shbeeb, L. (2007). The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures. *American Journal of Applied Sciences*.
- BALLIE, M., DELORME, J., HIernaux, R., & MOUTIER, F. (1990). *FORMULATION DES ENROBES - BILAN DES ESSAIS A LA PRESSE A CISAILLEMENT GIRATOIRE (PCG)*. BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES.
- Buncher, M., & Anderson, M. (2014). *Asphalt Mix Design Methods (7th Edition)*. USA: Asphalt Institute.
- Cabrera, J. (1991). *Assessment of the Workability of Bituminous Mixtures*. Highways and Transportation.

- Cabrera, J., & Dixon, J. (1994). *Performance and Durability of Bituminous Material. Proceeding of Symposium*. Leeds: University of Leeds.
- Chadborn, B., Newcomb, D., Voller, V., Desombre, R., Luoma, J., & Timm, D. (1998). *An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions*. University of Minnesota .
- Chatterjee, S., White, R., Prozzi, J., & Smit, A. (2006). *Development of Slump-Based Workability Test for Bituminous Maintenance Mixtures*. Washington DC: Transportation Research Board 85th Annual Meeting.
- Dalhat, M., & Wahhab, H.-A. (2017). *Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia*. International Journal of Pavement Engineering.
- EAPA. (2021). ASPHALT IN FIGURES. EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA).
- El-Naga, I., & Ragab, M. (2019). Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*.
- ESOGÜ. (2020). *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Ulaştırma Anabilim Dalı Laboratuvarı*.
https://www.youtube.com/channel/UCx0Q1hhWnX4MSTtYkSjLZ_Q
adresinden alındı
- Fransesqui, M., Rodríguez-Alloza b, A., & Gonzalez, C. (2023). Reuse of plastic waste in asphalt mixtures with residual porous aggregates. *Case Studies in Construction Materials*.
- González, P., Pérez, M., & Fresno, D. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*.
- Gudimettla, J. M., L. Allen Cooley, Jr., & Brown, E. (2003). *Workability Of Hot Mix Asphalt*. Auburn University.
- GÜLER, Ç., & ÇOBANOĞLU, Z. (1997). *Plastikler*. Ankara.
- Habib, N., Ibrahim, K., Napiyah, M., & Tan, I. (2010). *Rheological Properties of Polyethylene and Polypropylene Modified Bitumen*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:4, No:12.
- Haryanto, I., & Takahashi, O. (2007). EFFECT OF AGGREGATE GRADATION ON WORKABILITY OF HOT MIX ASPHALT MIXTURES. *THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING*.
- Hassani, A., Hossein, G., & Maghanaki, A. (2005). Use of plastic waste in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research*, 23(4).
- Heukelom, W. (1965). *The Role of Filler in Bituminous Mixtures*. Association Asphalt Paving Technol Proceedings.
- İlıcılı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., & Eren, K. (2001). *Afsalt ve Uygulamaları*. İstanbul: Asflat Bilimsel yayın no 1.
- İNKA YA, N. (2016). *Atık Plastiklerin Karayolunda Kullanımı*. İSPARTA.
- İzol, E. (2020). *Taş Mastik Asfalt Yapımında Mineral Filler Olark Mermer Tozunun Kullanılması*. Şanlıurfa: Yüksek Lisans Tezi.
- Küçükkaya, E. (2018, 02 28). *Enerji Portalı*.
<https://www.enerjiportali.com/polipropilen-nedir-nelerlerde-kullanilir/>
adresinden alındı

- Lewandowski, L. H. (1994). *Polymer Modification of Paving Asphalt Binders*. Rubber Chemistry and Technology.
- Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., & Xiao, R. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials*.
- Marvillet, J., & Bougault, P. (1979). *WORKABILITY OF BITUMINOUS MIXES, DEVELOPMENT OF A WORKABILITY METER*. Colorado: Association of Asphalt Paving Technologists.
- McLeod, N. (1967). *Influence of Viscosity of Asphalt Cements on Compaction of Paving Mixtures in the Field*. Washington, D.C: Highway Research Board, National Academy of Sciences.
- Mokhtari, A., & Nejad, F. (2013). *Comparative Study on Performance of Wax-Modified and Typical SMA Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering Volume 25, Issue 3.
- Moubark, S., Khodary, F., & Othman, A. (2017). Evaluation of Mechanical properties for polypropylene Modified Asphalt concrete Mixtures. *International Journal of Scientific Research and Management*.
- Nouali, M., Derriche, Z., Ghorbel, E., & Chuanqiang, L. (2018). Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements. *Road Materials and Pavement Design*.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları*. Ankara: Arastırma Gelistirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- Parker, C. (1960). *Steel-Tired Rollers*. Washington, D.C: Highway Research Board.
- Rahmat, N. U., Hassan, N. A., & Jaya, R. P. (2019). Effect of compaction temperature on the performance of dense-graded asphalt mixture. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., lee, D.-Y., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Sadeque, M., & Patil, K. (2014). *Marshall properties of waste polymer and nanoclay modified bitumen*. Facta universitatis - series Architecture and Civil Engineering 12(1):1-9.
- Şanlier, İ. (2018). Kuzey Marmara otoyolu projesi kapsamında taş mastik asfalt (TMA) uygulamaları, performanslarının karşılaştırılması ve maliyet analizi.
- Santucci, L., & Schmidt, R. (1962). *Setting Rate of Asphalt Concrete*. Washington DC: 41st Annual Meeting of the Highway Research Board.
- Setiawan, A., Suparma, L., & Mulyono, A. (2016, 08). The Effect of Aggregate Gradation on Workability of Asphalt Concrete. *International Journal of Engineering and Technology*.
- Sharuddin, S., Abnisa, F., Daud, W., & Aroua, M. (2016). *A review on pyrolysis of plastic wastes*. Kuala Lumpur, Malaysia: Energy Conversion and Management.
- Silva, J., Lucena, L., Rodrigues, J., Carvalho, M., & Costa, D. (2015). *Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder*. Petroleum Science and Technology 33(15):1508-1515.
- Siswosoebrotho, B., Ginting, K., & Soedirdjo, T. (2005). *Workability and Resilient Modulus of Asphalt Concrete Mixtures Containing Flaky Aggregates Shape*. Indonesia: Bandung Institute of Technology.
- Sultani, K. (2021). *Polipropilen Pirolyzi Kullanılarak Yapılan Taş Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri*. Konya: Yüksek Lisans Tezi.
- Tapkin, S. (2008). *The effect of polypropylene fibers on asphalt performance*. Bayburt: Building and Environment 43(6):1065-1071.

- Tattersol, G., & Banfill, P. (1999). *A New Rheometer For Soft-to-Fluid Fresh Concrete*. American concrete Institute Materials Journal.
- Terrel, R., Epps, J., & Crawford, C. (1988). *Making the Most of Temperature, Viscosity Characteristics*. Lanham, Maryland: NAPA.
- Tiwari, A., & Rao, Y. (2018). Study of plastic waste mixed bituminous concrete using dry process for road construction.
- TS EN 1426. (2008). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini*.
- TS1097-2. (2000). *Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar*. Ankara: TSE.
- Tunç, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*. Ankara: Asil Yayın Dağıtım.
- URL 1. (tarih yok). *ESSA GRUP*. <https://www.essagrup.com/tr/asfalt-tipleri/> adresinden alındı
- URL 10. (2013). *Teknomet. Teknomet Mühendislik Temsilcilik ve Ticaret Ltd.Şti*. <http://www.teknomet.com.tr/index.php/tr/tas-mastik-asfalt.html> adresinden alındı
- URL 2. (tarih yok). *PAGEV*. <https://pagev.org/plastik-nedir> adresinden alındı
- URL 3. (tarih yok). *Çevre Mühendisliği Paylaşım Ve İletişim Portalı*. Çevre mühendisliğinin paylaşım ve iletişim portalı: <https://www.cevremuhendisligi.org/index.php/sifir-atik/1106-plastik-atiklarin-geri-kazanimi> adresinden alındı
- URL 4. (2019, 10 01). *TÜRKİYE İSTATİSTİK KURUMU*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Belediye-Atik-Istatistikleri-2018-30666> adresinden alındı
- URL 5. (tarih yok). *SIFIR ATIK*. 10 15, 2021 tarihinde SIFIR ATIK: <https://sifiratik.gov.tr/plastik-atik> adresinden alındı
- URL 6. (tarih yok). *Eymen Petrokimya*. 2021 tarihinde <https://www.eymenpetrokimya.com.tr/urunler/> adresinden alındı
- URL 7. (tarih yok). *KALKAN GERİ DÖNÜŞÜM*. 2021 tarihinde <https://kalkangeridonusum.com/plastik-turleri-nelerdir/> adresinden alındı
- URL 8. (tarih yok). *Vatan Varil*. <https://vatanvaril.com/sayfa/hdpe-granul/> adresinden alındı
- URL 9. (tarih yok). *Tüter Plastik*. 2021 tarihinde <https://tuterplastik.com/detay.asp?no=398> adresinden alındı
- Vargas, M., Vargas, M., Solís, A., & Manero, O. (2013). *Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling*. *Construction and Building Materials* 45:243–250.
- Wahhab, H.-A., Dalhat, M., & Habib, M. (2016). Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*.
- Whiteoak, D. (2004). *SHELL BİTÜM EL KİTABI*. İstanbul: İSFALT Bilimsel Yayın.
- YENER, E. (2010). *Bitümlü Sıcak Karışımlar İçin Yeni Bir İşlenebilirlik Yönteminin Araştırılması*. Erzurum: Doktora Tezi.

EKLER

EK-1 Marshall Tasarım Tabloları

NO	BİTÜM		Numune Yükseklikleri				Havadaki A _g	Sudaki A _g	YKSD A _g	HACİM	Hacim Ö _z	Maks.teo. C	% Boşluk	W _b	%	Asf.Dolu Boşluk	AKMA	Stabilite	Düzelme	Düzeltilmiş
	Wa %	Gr	1	2	3	Ortalama	A	C	B	V	DP	DT	V _h	W _b	VMA	V _f	mm	KN	Faktörü	Stabilite
1	3.5	40.25	61	61.5	61.5	61.33	1174	692	1184.5	432.5	2.384	2.560	6.75	3.38	15.41	56.19	5.1	10.23	1.061	10.85
2	3.5	40.25	62	61	62	61.67	1176	692.5	1185	432.5	2.388						5.45	10.8	1.052	11.38
3	3.5	40.25	61	61.5	62	61.50	1178	693.5	1186.5	433	2.389						5.63	11.14	1.058	11.77
											2.397						5.40			11.33
1	4	46	62	61	61	61.33	1191.5	706.5	1197	430.5	2.429	2.542	4.14	3.85	14.07	70.57	5.21	12.32	1.054	12.99
2	4	46	59.5	60	60	59.83	1192	703.5	1197.5	430	2.443						4.81	10.23	1.107	11.32
3	4	46	60.5	60.5	61	60.67	1191	702	1196.5	434.5	2.438						4.41	12.95	1.080	13.98
											2.436						4.81			12.76
1	4.5	51.75	59.5	59.5	60	59.67	1177.5	698	1180	482	2.443	2.524	3.39	4.31	14.41	76.49	6.35	8.79	1.112	9.77
2	4.5	51.75	61	61	61.5	61.17	1173.5	693	1176.5	483.5	2.427						5.06	7.71	1.058	8.16
3	4.5	51.75	60	60	60.5	60.17	1191	707.5	1194.5	487	2.446						7.3	9.15	1.097	10.04
											2.433						6.24			9.32
1	5	57.5	59	59.5	59	59.17	1173.5	700.5	1175.5	475	2.471	2.507	1.99	4.76	14.18	85.94	5.17	8.5	1.126	9.57
2	5	57.5	59.5	59	59.5	59.33	1187.5	704.5	1190	485.5	2.446						5.7	8.39	1.122	9.41
3	5	57.5	60	59	59.5	59.50	1197.5	713	1201	488	2.454						6.6	8.3	1.117	9.27
											2.457						5.82			9.42
1	5.5	63.25	60	60.5	60.5	60.33	1188	704.5	1189.5	485	2.449	2.490	1.61	5.21	14.84	89.12	8.34	7	1.089	7.62
2	5.5	63.25	60	60.5	60	60.17	1190	707	1191	484	2.459						7.73	6.96	1.097	7.64
3	5.5	63.25	60	60.5	60.5	60.33	1187.5	702	1188.5	486.5	2.441						7.23	6.72	1.089	7.32
											2.450						7.77			7.53
1	6	69	60.5	61	61	60.83	1189.5	704	1190.5	486.5	2.445	2.473	1.20	5.66	15.44	92.24	9.01	6.1	1.075	6.58
2	6	69	60	60	60.5	60.17	1195	701	1186	485	2.443						8.21	6.55	1.097	7.19
3	6	69	60.5	60.5	61	60.67	1197	708.5	1196.5	490	2.443						8.73	6.4	1.080	6.91
											2.444						8.65			6.88

Saf bitümlü yapılan karışımların Marshall tasarım tablosu


BİTÜM		Numune Yükseklikleri				Havadaki A _g	Sudaki A _g	YKSD A _g	HACİM	Hacim Ö _z	Maks.teo. C	% Boşluk	W _b	%	Asf.Dolu Boşluk	AKMA	Stabilite	Düzelme	Düzeltilmiş
Wa	Gr	1	2	3	Ortalama	Ağırlık	Ağırlık	Ağırlık	V	DP	DT	V _h	W _b	VMA	V _f	mm	KN	Faktörü	Stabilite
3.5	40.25	61	62	61.5	61.50	1178	698.5	1187	488.5	2.411	2.57	5.95	3.38	14.39	58.67	4.83	12.01	1.056	12.68
3.5	40.25	61	62	61	61.33	1181	701.5	1188.5	487	2.425						5.31	11.85	1.061	12.58
3.5	40.25	61	62	62	61.67	1174	694	1181	487	2.411						5.06	12.16	1.052	12.79
										2.416						5.07			12.68
4	46	60	60.5	60	60.17	1180	702	1186	484	2.438	2.55	4.33	3.85	13.96	68.96	5.3	12.68	1.097	13.91
4	46	61	60	61	60.67	1168.5	694	1174.5	480.5	2.432						5.87	11.74	1.080	12.67
4	46	60.5	60.5	61	60.67	1174.5	698	1177.5	479.5	2.449						5.66	11.57	1.080	12.49
										2.440						5.61			13.03
4.5	51.75	61	61	60.5	60.83	1188.5	705	1191.5	486.5	2.443	2.53	3.39	4.31	14.13	76.01	5.86	11.33	1.075	12.18
4.5	51.75	60	60	60	60.00	1188	706.5	1192	485.5	2.447						5.99	11.2	1.102	12.34
4.5	51.75	60	60	61	60.33	1182	701.5	1184	482.5	2.450						6	11.29	1.089	12.30
										2.447						5.95			12.27
5	57.5	61	61	60.5	60.83	1193	709.5	1195.5	486	2.455	2.51	2.19	4.76	14.08	84.43	6.76	10.14	1.075	10.90
5	57.5	60	60.5	60	60.17	1190.5	708	1193	485	2.455						7.52	10.82	1.097	11.87
5	57.5	60	60	60	60.00	1182	705.5	1184	478.5	2.470						5.79	10.6	1.102	11.68
										2.460						6.69			11.49
5.5	63.25	61	60	61	60.67	1181	702.5	1182.5	480	2.460	2.50	1.54	5.21	14.50	89.36	6.27	7.56	1.080	8.16
5.5	63.25	60	60	60.5	60.17	1177.5	700.5	1179	478.5	2.461						7.81	8.98	1.097	9.85
5.5	63.25	60	60.5	60.5	60.33	1185.5	704.5	1187	482.5	2.457						7.11	8.19	1.089	8.92
										2.459						7.06			8.98
6	69	61.5	61.5	61	61.33	1183.5	700	1183.5	483.5	2.448	2.48	1.28	5.66	15.24	91.63	6.81	7.82	1.061	8.30
6	69	61	61	61.5	61.17	1185	703	1186	483	2.453						6.76	7.79	1.066	8.30
6	69	60.5	61	61	60.83	1192	705.5	1192.5	487	2.448						6.79	7.82	1.075	8.41
										2.450						6.79			8.34

%3NPP katkılı bitümlü yapılan karışımların Marshall tasarım tablosu

NO	BİTÜM		Numune Yükseklikleri				Havadaki	Sudaki	YKSD	HACİM	Hacim Öz	Maks.teo.	% Boşluk		%	Asf.Dolu Boşluk %	AKMA mm	Stabilite kg	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa %	Gr	1	2	3	Ortalama	Ağırlık	Ağırlık	Ağırlık	V	DP	DT	Vh	Wb	VMA	Vf				
1	3.5	40.25	61	62	62	61.67	1172	695.5	1181	485.5	2.414						4.47	12.83	1.052	13.49
2	3.5	40.25	61	62	62.5	61.83	1173	696	1182	486	2.414	2.56	5.71	3.38	14.46	60.54	5.27	11.2	1.047	11.72
3	3.5	40.25	61	61	62	61.33	1175.5	696	1183	487	2.414						5.8	12.7	1.061	13.47
											2.414						5.18			12.90
1	4	46	61	60.5	61	60.83	1180	703	1185.5	482.5	2.446						5.33	12.27	1.075	13.19
2	4	46	61	60.5	61	60.83	1180.5	701.5	1185	483.5	2.442	2.54	3.86	3.85	13.82	72.10	5.31	12.7	1.075	13.65
3	4	46	60.5	61.5	61	61.00	1180.5	706	1189	483	2.444						6.2	13.54	1.070	14.49
											2.444						5.61			13.78
1	4.5	51.75	60	61	60	60.33	1188	706	1190.5	484.5	2.452						5.35	12.2	1.089	13.29
2	4.5	51.75	60	61	61	60.67	1187.5	705	1189.5	484.5	2.451	2.52	2.62	4.31	13.73	80.91	5.36	10.11	1.080	10.92
3	4.5	51.75	60	59.5	59	59.50	1178.5	704	1181	477	2.471						5.6	10.76	1.117	12.02
											2.458						5.44			12.07
1	5	57.5	60.5	61	60.5	60.67	1188	709	1189.5	480.5	2.472						6.89	10.13	1.080	10.94
2	5	57.5	60	60	60	60.00	1194	711.5	1195.5	484	2.467	2.51	1.57	4.76	13.82	88.60	6.01	9.63	1.102	10.61
3	5	57.5	60	59.5	60	59.83	1182	704	1184	480	2.463						5.67	8.69	1.107	9.62
											2.467						6.19			10.39
1	5.5	63.25	60	60	61	60.33	1188	706	1189	483	2.460						9.19	8.24	1.089	8.98
2	5.5	63.25	60	60	60.5	60.17	1191	708.5	1192.5	484	2.461	2.49	1.27	5.21	14.54	91.28	11.86	8.79	1.097	9.64
3	5.5	63.25	60	60	60.5	60.17	1188	705.5	1189.5	484	2.455						8.3	8.65	1.097	9.49
											2.458						9.78			9.37
1	6	69	61.5	61	61	61.17	1184.5	701	1184.5	483.5	2.450						8.14	7.88	1.066	8.40
2	6	69	61.5	60.5	61	61.00	1187	703	1187.5	484.5	2.450	2.47	0.88	5.66	15.17	94.18	9.11	8.14	1.070	8.71
3	6	69	60.5	60.5	61	60.67	1193	707.5	1193.5	486	2.455						7.86	7.96	1.080	8.60
											2.452						8.37			8.57

%5NPP katkılı bitümle yapılan karışımların Marshall tasarım tablosu

EK-2 TMA Karışımların GSM Tasarım Sonuçları

						
Masters of Technology						
Single Test diam. 150 mm						
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	148.5	1873	23.2	34.4	32.6	76.8
2	144.2	1929	20.8	32.4	35.6	79.2
3	141.4	1967	19.3	31.1	37.9	80.7
4	139.3	1996	18.1	30.0	39.7	81.9
5	137.7	2019	17.1	29.2	41.3	82.9
6	136.3	2040	16.3	28.5	42.8	83.7
7	135.2	2057	15.6	27.9	44.1	84.4
8	134.2	2072	15.0	27.4	45.3	85.0
9	133.3	2086	14.4	26.9	46.4	85.6
10	132.5	2098	13.9	26.5	47.4	86.1
11	131.9	2109	13.5	26.1	48.4	86.5
12	131.2	2119	13.0	25.7	49.3	87.0
13	130.6	2129	12.7	25.4	50.2	87.3
14	130.1	2137	12.3	25.1	51.0	87.7
15	129.6	2146	12.0	24.8	51.7	88.0
16	129.2	2153	11.7	24.5	52.5	88.3
17	128.7	2161	11.3	24.3	53.2	88.7
18	128.3	2167	11.1	24.0	53.9	88.9
19	127.9	2174	10.8	23.8	54.6	89.2
20	127.6	2180	10.5	23.6	55.3	89.5
21	127.2	2186	10.3	23.4	55.9	89.7
22	126.9	2191	10.1	23.2	56.5	89.9
23	126.6	2197	9.9	23.0	57.1	90.1
24	126.3	2202	9.7	22.8	57.7	90.3
25	126.0	2207	9.5	22.7	58.3	90.5
26	125.8	2211	9.3	22.5	58.8	90.7
27	125.5	2216	9.1	22.3	59.4	90.9
28	125.2	2220	8.9	22.2	59.9	91.1
29	125.0	2225	8.7	22.0	60.4	91.3
30	124.8	2229	8.5	21.9	60.9	91.5
31	124.6	2233	8.4	21.7	61.4	91.6
32	124.3	2236	8.2	21.6	61.9	91.8
33	124.1	2240	8.1	21.5	62.4	91.9
34	123.9	2244	7.9	21.4	62.8	92.1
35	123.8	2247	7.8	21.2	63.3	92.2
36	123.6	2250	7.7	21.1	63.7	92.3
37	123.4	2254	7.5	21.0	64.2	92.5
38	123.2	2257	7.4	20.9	64.6	92.6
39	123.1	2260	7.3	20.8	65.0	92.7
40	122.9	2262	7.2	20.7	65.4	92.8
41	122.8	2265	7.1	20.6	65.8	92.9
42	122.6	2268	6.9	20.5	66.2	93.1
43	122.5	2271	6.8	20.4	66.6	93.2
44	122.3	2274	6.7	20.3	67.0	93.3
45	122.2	2276	6.6	20.2	67.3	93.4
46	122.0	2279	6.5	20.1	67.7	93.5
47	121.9	2281	6.4	20.0	68.1	93.6
48	121.8	2284	6.3	20.0	68.4	93.7
49	121.7	2286	6.2	19.9	68.8	93.8
50	121.5	2288	6.1	19.8	69.2	93.9

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Saf OBİ ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	154.4	1803	26.6	36.5	27.2	73.4
2	149.6	1862	24.2	34.4	29.7	75.8
3	146.4	1902	22.5	33.0	31.7	77.5
4	144.1	1932	21.3	31.9	33.2	78.7
5	142.3	1956	20.3	31.1	34.6	79.7
6	140.9	1977	19.5	30.3	35.8	80.5
7	139.6	1994	18.8	29.7	36.9	81.2
8	138.5	2010	18.1	29.2	37.8	81.9
9	137.6	2023	17.6	28.7	38.7	82.4
10	136.8	2036	17.1	28.3	39.6	82.9
11	136.0	2047	16.6	27.9	40.4	83.4
12	135.3	2057	16.2	27.5	41.1	83.8
13	134.7	2067	15.8	27.2	41.8	84.2
14	134.1	2076	15.4	26.9	42.5	84.6
15	133.6	2084	15.1	26.6	43.1	84.9
16	133.1	2092	14.8	26.3	43.7	85.2
17	132.6	2099	14.5	26.0	44.3	85.5
18	132.2	2106	14.2	25.8	44.9	85.8
19	131.8	2112	14.0	25.6	45.4	86.0
20	131.4	2119	13.7	25.3	45.9	86.3
21	131.1	2124	13.5	25.1	46.4	86.5
22	130.7	2130	13.2	24.9	46.9	86.8
23	130.4	2135	13.0	24.8	47.4	87.0
24	130.1	2140	12.8	24.6	47.8	87.2
25	129.8	2145	12.6	24.4	48.3	87.4
26	129.6	2149	12.5	24.3	48.7	87.5
27	129.3	2153	12.3	24.1	49.1	87.7
28	129.0	2158	12.1	24.0	49.5	87.9
29	128.8	2162	12.0	23.8	49.8	88.0
30	128.6	2166	11.8	23.7	50.2	88.2
31	128.4	2169	11.6	23.6	50.6	88.4
32	128.1	2173	11.5	23.4	51.0	88.5
33	127.9	2176	11.3	23.3	51.3	88.7
34	127.7	2180	11.2	23.2	51.6	88.8
35	127.6	2183	11.1	23.1	52.0	88.9
36	127.4	2186	11.0	23.0	52.3	89.0
37	127.2	2189	10.8	22.9	52.6	89.2
38	127.0	2192	10.7	22.8	52.9	89.3
39	126.9	2195	10.6	22.7	53.2	89.4
40	126.7	2198	10.5	22.6	53.5	89.5
41	126.5	2200	10.4	22.5	53.8	89.6
42	126.4	2203	10.3	22.4	54.1	89.7
43	126.2	2206	10.1	22.3	54.4	89.9
44	126.1	2208	10.1	22.2	54.7	89.9
45	125.9	2211	9.9	22.1	55.0	90.1
46	125.8	2213	9.9	22.0	55.2	90.1
47	125.7	2215	9.8	21.9	55.5	90.2
48	125.5	2218	9.7	21.8	55.8	90.3
49	125.4	2220	9.6	21.8	56.1	90.4
50	125.3	2222	9.5	21.7	56.3	90.5

Saf (OBİ -0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	149.9	1874	22.5	34.7	35.0	77.5
2	145.4	1931	20.2	32.7	38.2	79.8
3	142.6	1969	18.6	31.3	40.6	81.4
4	140.5	1999	17.4	30.3	42.6	82.6
5	138.9	2022	16.4	29.5	44.3	83.6
6	137.5	2043	15.6	28.8	45.9	84.4
7	136.3	2060	14.8	28.2	47.3	85.2
8	135.3	2076	14.2	27.6	48.6	85.8
9	134.4	2090	13.6	27.1	49.8	86.4
10	133.6	2103	13.1	26.7	50.9	86.9
11	132.9	2114	12.6	26.3	52.0	87.4
12	132.2	2124	12.2	25.9	52.9	87.8
13	131.6	2134	11.8	25.6	53.9	88.2
14	131.1	2143	11.4	25.3	54.8	88.6
15	130.6	2151	11.1	25.0	55.6	88.9
16	130.1	2159	10.8	24.7	56.4	89.2
17	129.7	2166	10.5	24.5	57.2	89.5
18	129.3	2173	10.2	24.2	58.0	89.8
19	128.9	2179	9.9	24.0	58.7	90.1
20	128.5	2185	9.7	23.8	59.3	90.3
21	128.2	2191	9.4	23.6	60.0	90.6
22	127.9	2197	9.2	23.4	60.6	90.8
23	127.6	2202	9.0	23.2	61.3	91.0
24	127.3	2207	8.8	23.1	61.9	91.2
25	127.0	2212	8.6	22.9	62.5	91.4
26	126.7	2216	8.4	22.7	63.0	91.6
27	126.5	2221	8.2	22.6	63.6	91.8
28	126.2	2225	8.0	22.4	64.2	92.0
29	126.0	2229	7.9	22.3	64.7	92.1
30	125.8	2233	7.7	22.1	65.2	92.3
31	125.6	2237	7.5	22.0	65.7	92.5
32	125.4	2240	7.4	21.9	66.2	92.6
33	125.2	2244	7.3	21.8	66.6	92.7
34	125.0	2247	7.1	21.6	67.1	92.9
35	124.8	2251	7.0	21.5	67.6	93.0
36	124.6	2254	6.8	21.4	68.0	93.2
37	124.4	2257	6.7	21.3	68.5	93.3
38	124.3	2260	6.6	21.2	68.9	93.4
39	124.1	2263	6.5	21.1	69.4	93.5
40	124.0	2266	6.4	21.0	69.8	93.6
41	123.8	2269	6.2	20.9	70.2	93.8
42	123.6	2272	6.1	20.8	70.6	93.9
43	123.5	2274	6.0	20.7	71.0	94.0
44	123.4	2277	5.9	20.6	71.4	94.1
45	123.2	2279	5.8	20.5	71.8	94.2
46	123.1	2282	5.7	20.4	72.2	94.3
47	123.0	2284	5.6	20.4	72.5	94.4
48	122.8	2287	5.5	20.3	72.9	94.5
49	122.7	2289	5.4	20.2	73.3	94.6
50	122.6	2291	5.3	20.1	73.6	94.7

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Saf (OBİ +0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROLS Your Partners							Page 1
Masters of Technology							Date : _____
Single Test diam. 150 mm							Technician : _____
							Project : _____
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	150.3	1865	23.4	34.7	32.5	76.6	
2	145.7	1924	21.0	32.6	35.6	79.0	
3	142.7	1964	19.4	31.2	38.0	80.6	
4	140.5	1995	18.1	30.1	40.0	81.9	
5	138.8	2020	17.1	29.3	41.7	82.9	
6	137.3	2041	16.2	28.5	43.2	83.8	
7	136.1	2059	15.5	27.9	44.6	84.5	
8	135.1	2075	14.8	27.4	45.8	85.2	
9	134.2	2089	14.2	26.9	47.0	85.8	
10	133.4	2101	13.7	26.4	48.1	86.3	
11	132.7	2113	13.3	26.0	49.1	86.7	
12	132.0	2123	12.8	25.7	50.0	87.2	
13	131.4	2132	12.5	25.3	50.8	87.5	
14	130.9	2141	12.1	25.0	51.7	87.9	
15	130.4	2149	11.8	24.7	52.5	88.2	
16	129.9	2157	11.4	24.5	53.2	88.6	
17	129.5	2164	11.2	24.2	54.0	88.8	
18	129.1	2171	10.9	24.0	54.7	89.1	
19	128.7	2177	10.6	23.8	55.4	89.4	
20	128.4	2183	10.4	23.6	56.0	89.6	
21	128.0	2189	10.1	23.3	56.6	89.9	
22	127.7	2195	9.9	23.2	57.3	90.1	
23	127.4	2200	9.7	23.0	57.8	90.3	
24	127.1	2205	9.5	22.8	58.4	90.5	
25	126.9	2209	9.3	22.6	59.0	90.7	
26	126.6	2214	9.1	22.5	59.5	90.9	
27	126.4	2218	8.9	22.3	60.0	91.1	
28	126.1	2223	8.7	22.2	60.5	91.3	
29	125.9	2227	8.6	22.0	61.1	91.4	
30	125.7	2231	8.4	21.9	61.6	91.6	
31	125.4	2235	8.3	21.8	62.1	91.7	
32	125.2	2238	8.1	21.6	62.5	91.9	
33	125.0	2242	8.0	21.5	63.0	92.0	
34	124.8	2245	7.8	21.4	63.4	92.2	
35	124.7	2248	7.7	21.3	63.9	92.3	
36	124.5	2252	7.6	21.2	64.3	92.4	
37	124.3	2255	7.4	21.0	64.7	92.6	
38	124.2	2258	7.3	20.9	65.1	92.7	
39	124.0	2261	7.2	20.8	65.5	92.8	
40	123.8	2263	7.1	20.7	65.9	92.9	
41	123.7	2266	7.0	20.6	66.3	93.0	
42	123.5	2269	6.9	20.6	66.7	93.1	
43	123.4	2271	6.7	20.5	67.0	93.3	
44	123.3	2274	6.6	20.4	67.4	93.4	
45	123.1	2277	6.5	20.3	67.8	93.5	
46	123.0	2279	6.4	20.2	68.1	93.6	
47	122.9	2281	6.3	20.1	68.5	93.7	
48	122.8	2283	6.3	20.0	68.8	93.7	
49	122.6	2286	6.2	20.0	69.2	93.8	
50	122.5	2288	6.1	19.9	69.5	93.9	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%5PP katkılı OBİ ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	152.1	1831	25.4	35.6	28.6	74.6
2	147.2	1892	22.9	33.4	31.5	77.1
3	144.0	1934	21.2	31.9	33.7	78.8
4	141.7	1965	19.9	30.8	35.5	80.1
5	139.9	1991	18.8	29.9	37.0	81.2
6	138.4	2012	18.0	29.2	38.4	82.0
7	137.2	2030	17.2	28.5	39.6	82.8
8	136.1	2046	16.6	28.0	40.7	83.4
9	135.1	2061	16.0	27.5	41.7	84.0
10	134.3	2074	15.5	27.0	42.7	84.5
11	133.5	2085	15.0	26.6	43.6	85.0
12	132.9	2096	14.6	26.2	44.4	85.4
13	132.3	2106	14.2	25.9	45.2	85.8
14	131.7	2115	13.8	25.6	46.0	86.2
15	131.2	2123	13.5	25.3	46.7	86.5
16	130.7	2131	13.2	25.0	47.4	86.8
17	130.3	2138	12.9	24.7	48.0	87.1
18	129.8	2145	12.6	24.5	48.7	87.4
19	129.4	2151	12.3	24.3	49.3	87.7
20	129.1	2158	12.0	24.0	49.9	88.0
21	128.7	2164	11.8	23.8	50.5	88.2
22	128.4	2169	11.6	23.6	51.0	88.4
23	128.1	2174	11.4	23.5	51.5	88.6
24	127.8	2180	11.2	23.3	52.1	88.8
25	127.5	2185	11.0	23.1	52.6	89.0
26	127.2	2189	10.8	22.9	53.1	89.2
27	126.9	2194	10.6	22.8	53.5	89.4
28	126.7	2198	10.4	22.6	54.0	89.6
29	126.5	2202	10.2	22.5	54.5	89.8
30	126.2	2206	10.1	22.3	54.9	89.9
31	126.0	2210	9.9	22.2	55.3	90.1
32	125.8	2214	9.8	22.1	55.7	90.2
33	125.6	2217	9.6	21.9	56.2	90.4
34	125.4	2221	9.5	21.8	56.6	90.5
35	125.2	2224	9.3	21.7	57.0	90.7
36	125.0	2227	9.2	21.6	57.4	90.8
37	124.8	2231	9.1	21.5	57.7	90.9
38	124.7	2234	9.0	21.4	58.1	91.0
39	124.5	2237	8.8	21.3	58.5	91.2
40	124.3	2240	8.7	21.2	58.8	91.3
41	124.2	2242	8.6	21.1	59.2	91.4
42	124.0	2245	8.5	21.0	59.5	91.5
43	123.9	2248	8.4	20.9	59.8	91.6
44	123.8	2250	8.3	20.8	60.2	91.7
45	123.6	2253	8.2	20.7	60.5	91.8
46	123.5	2255	8.1	20.6	60.8	91.9
47	123.4	2257	8.0	20.5	61.1	92.0
48	123.2	2260	7.9	20.4	61.4	92.1
49	123.1	2262	7.8	20.4	61.8	92.2
50	123.0	2264	7.7	20.3	62.0	92.3

%5PP katkılı (OBİ-0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	149.0	1889	21.9	34.2	36.0	78.1
2	144.4	1950	19.4	32.1	39.6	80.6
3	141.4	1990	17.7	30.7	42.3	82.3
4	139.3	2021	16.4	29.6	44.5	83.6
5	137.6	2045	15.4	28.8	46.4	84.6
6	136.2	2066	14.6	28.0	48.1	85.4
7	135.0	2084	13.8	27.4	49.6	86.2
8	134.0	2100	13.1	26.8	51.0	86.9
9	133.1	2115	12.6	26.3	52.4	87.4
10	132.3	2127	12.0	25.9	53.6	88.0
11	131.6	2139	11.6	25.5	54.7	88.4
12	130.9	2149	11.1	25.1	55.8	88.9
13	130.4	2159	10.7	24.8	56.8	89.3
14	129.8	2168	10.4	24.5	57.7	89.6
15	129.3	2176	10.0	24.2	58.6	90.0
16	128.9	2184	9.7	23.9	59.5	90.3
17	128.4	2191	9.4	23.7	60.4	90.6
18	128.0	2198	9.1	23.5	61.1	90.9
19	127.7	2204	8.8	23.2	61.9	91.2
20	127.3	2211	8.6	23.0	62.7	91.4
21	127.0	2216	8.4	22.8	63.4	91.6
22	126.7	2222	8.1	22.6	64.1	91.9
23	126.4	2227	7.9	22.4	64.8	92.1
24	126.1	2232	7.7	22.3	65.4	92.3
25	125.8	2237	7.5	22.1	66.1	92.5
26	125.5	2242	7.3	21.9	66.7	92.7
27	125.3	2246	7.1	21.8	67.3	92.9
28	125.0	2251	6.9	21.6	67.9	93.1
29	124.8	2255	6.8	21.5	68.5	93.2
30	124.6	2259	6.6	21.3	69.1	93.4
31	124.4	2263	6.4	21.2	69.7	93.6
32	124.2	2267	6.3	21.1	70.2	93.7
33	124.0	2270	6.1	20.9	70.8	93.9
34	123.8	2274	6.0	20.8	71.3	94.0
35	123.6	2277	5.8	20.7	71.8	94.2
36	123.4	2280	5.7	20.6	72.3	94.3
37	123.3	2283	5.6	20.5	72.7	94.4
38	123.1	2286	5.5	20.4	73.2	94.5
39	122.9	2289	5.3	20.3	73.7	94.7
40	122.8	2292	5.2	20.2	74.1	94.8
41	122.6	2295	5.1	20.1	74.6	94.9
42	122.5	2297	5.0	20.0	75.0	95.0
43	122.4	2300	4.9	19.9	75.4	95.1
44	122.2	2302	4.8	19.8	75.8	95.2
45	122.1	2305	4.7	19.7	76.3	95.3
46	122.0	2307	4.6	19.6	76.6	95.4
47	121.9	2310	4.5	19.6	77.0	95.5
48	121.7	2312	4.4	19.5	77.4	95.6
49	121.6	2314	4.3	19.4	77.7	95.7
50	121.4	2319	4.1	19.2	78.7	95.9

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%5PP katkılı (OBİ+0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	150.3	1869	23.0	34.8	33.9	77.0
2	145.8	1926	20.6	32.8	37.1	79.4
3	142.8	1966	19.0	31.4	39.5	81.0
4	140.6	1997	17.7	30.3	41.6	82.3
5	138.9	2022	16.7	29.4	43.3	83.3
6	137.5	2043	15.8	28.7	44.9	84.2
7	136.3	2061	15.1	28.1	46.3	84.9
8	135.3	2077	14.4	27.5	47.6	85.6
9	134.3	2091	13.8	27.0	48.8	86.2
10	133.5	2103	13.3	26.6	49.9	86.7
11	132.8	2115	12.9	26.2	50.9	87.1
12	132.2	2125	12.4	25.8	51.9	87.6
13	131.6	2135	12.0	25.5	52.8	88.0
14	131.0	2144	11.7	25.2	53.7	88.3
15	130.5	2152	11.3	24.9	54.5	88.7
16	130.0	2160	11.0	24.6	55.3	89.0
17	129.6	2167	10.7	24.4	56.1	89.3
18	129.2	2173	10.4	24.1	56.8	89.6
19	128.8	2180	10.2	23.9	57.5	89.8
20	128.5	2186	9.9	23.7	58.2	90.1
21	128.1	2192	9.7	23.5	58.8	90.3
22	127.8	2197	9.5	23.3	59.4	90.5
23	127.5	2203	9.2	23.1	60.1	90.8
24	127.2	2208	9.0	22.9	60.7	91.0
25	126.9	2213	8.8	22.8	61.3	91.2
26	126.7	2217	8.6	22.6	61.8	91.4
27	126.4	2222	8.4	22.5	62.4	91.6
28	126.2	2226	8.3	22.3	62.9	91.7
29	126.0	2230	8.1	22.2	63.4	91.9
30	125.7	2234	8.0	22.0	63.9	92.0
31	125.5	2238	7.8	21.9	64.4	92.2
32	125.3	2241	7.6	21.8	64.9	92.4
33	125.1	2245	7.5	21.7	65.4	92.5
34	125.0	2248	7.4	21.5	65.8	92.6
35	124.8	2251	7.2	21.4	66.3	92.8
36	124.6	2254	7.1	21.3	66.7	92.9
37	124.4	2257	7.0	21.2	67.1	93.0
38	124.3	2260	6.9	21.1	67.5	93.1
39	124.1	2263	6.7	21.0	68.0	93.3
40	123.9	2266	6.6	20.9	68.4	93.4
41	123.8	2269	6.5	20.8	68.7	93.5
42	123.6	2272	6.4	20.7	69.2	93.6
43	123.5	2274	6.3	20.6	69.6	93.7
44	123.4	2277	6.2	20.5	69.9	93.8
45	123.2	2279	6.1	20.4	70.3	93.9
46	123.1	2282	6.0	20.4	70.7	94.0
47	123.0	2284	5.9	20.3	71.0	94.1
48	122.8	2287	5.8	20.2	71.4	94.2
49	122.7	2289	5.7	20.1	71.7	94.3
50	122.5	2292	5.5	20.0	72.3	94.5

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%4.5SBS katkılı OBI-ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	150.4	1860	23.9	34.7	31.2	76.1
2	145.8	1920	21.4	32.6	34.3	78.6
3	142.8	1960	19.8	31.2	36.6	80.2
4	140.6	1991	18.5	30.1	38.5	81.5
5	138.8	2016	17.5	29.3	40.1	82.5
6	137.4	2037	16.7	28.5	41.6	83.3
7	136.2	2055	15.9	27.9	42.9	84.1
8	135.2	2071	15.3	27.3	44.1	84.7
9	134.3	2084	14.7	26.9	45.2	85.3
10	133.5	2097	14.2	26.4	46.2	85.8
11	132.8	2108	13.7	26.0	47.2	86.3
12	132.1	2119	13.3	25.7	48.1	86.7
13	131.5	2128	12.9	25.3	49.0	87.1
14	130.9	2137	12.6	25.0	49.8	87.4
15	130.4	2146	12.2	24.7	50.6	87.8
16	130.0	2153	11.9	24.4	51.3	88.1
17	129.5	2161	11.6	24.2	52.0	88.4
18	129.1	2167	11.3	24.0	52.7	88.7
19	128.7	2174	11.1	23.7	53.4	88.9
20	128.4	2180	10.8	23.5	54.0	89.2
21	128.0	2186	10.6	23.3	54.6	89.4
22	127.7	2191	10.3	23.1	55.3	89.7
23	127.4	2197	10.1	22.9	55.8	89.9
24	127.1	2202	9.9	22.7	56.4	90.1
25	126.8	2206	9.7	22.6	56.9	90.3
26	126.6	2211	9.5	22.4	57.4	90.5
27	126.3	2215	9.4	22.3	57.9	90.6
28	126.1	2219	9.2	22.1	58.4	90.8
29	125.9	2223	9.0	22.0	58.9	91.0
30	125.7	2227	8.9	21.9	59.4	91.1
31	125.4	2231	8.7	21.7	59.8	91.3
32	125.3	2234	8.6	21.6	60.3	91.4
33	125.1	2238	8.4	21.5	60.7	91.6
34	124.9	2241	8.3	21.4	61.1	91.7
35	124.7	2244	8.2	21.2	61.6	91.8
36	124.5	2248	8.0	21.1	62.0	92.0
37	124.3	2251	7.9	21.0	62.4	92.1
38	124.2	2254	7.8	20.9	62.8	92.2
39	124.0	2257	7.7	20.8	63.2	92.3
40	123.9	2259	7.6	20.7	63.5	92.4
41	123.7	2262	7.4	20.6	63.9	92.6
42	123.6	2265	7.3	20.5	64.3	92.7
43	123.4	2268	7.2	20.4	64.7	92.8
44	123.3	2270	7.1	20.3	65.0	92.9
45	123.1	2273	7.0	20.2	65.4	93.0
46	123.0	2275	6.9	20.2	65.7	93.1
47	122.9	2278	6.8	20.1	66.1	93.2
48	122.7	2280	6.7	20.0	66.4	93.3
49	122.6	2282	6.6	19.9	66.7	93.4
50	122.5	2284	6.5	19.8	67.1	93.5

%4.5SBS katkılı (OBİ-0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları



Masters of Technology

Single Test diam. 150 mm

Page : 1

Date : _____



Technician : _____

Project : _____

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	149.9	1879	22.0	34.8	36.7	78.0
2	145.3	1938	19.6	32.7	40.2	80.4
3	142.3	1978	17.9	31.3	42.9	82.1
4	140.2	2009	16.6	30.3	45.0	83.4
5	138.5	2033	15.6	29.4	46.9	84.4
6	137.1	2054	14.8	28.7	48.6	85.2
7	135.9	2072	14.0	28.1	50.1	86.0
8	134.9	2088	13.4	27.5	51.5	86.6
9	134.0	2102	12.8	27.0	52.8	87.2
10	133.2	2114	12.2	26.6	54.0	87.8
11	132.5	2126	11.8	26.2	55.1	88.2
12	131.8	2137	11.3	25.8	56.1	88.7
13	131.2	2146	10.9	25.5	57.1	89.1
14	130.7	2155	10.5	25.2	58.1	89.5
15	130.1	2164	10.2	24.9	59.0	89.8
16	129.7	2171	9.9	24.6	59.9	90.1
17	129.3	2179	9.6	24.4	60.7	90.4
18	128.8	2186	9.3	24.1	61.5	90.7
19	128.5	2192	9.0	23.9	62.2	91.0
20	128.1	2198	8.8	23.7	63.0	91.2
21	127.8	2204	8.5	23.5	63.7	91.5
22	127.4	2210	8.3	23.3	64.4	91.7
23	127.1	2215	8.1	23.1	65.0	91.9
24	126.8	2220	7.9	22.9	65.7	92.1
25	126.6	2225	7.7	22.8	66.3	92.3
26	126.3	2230	7.5	22.6	67.0	92.5
27	126.1	2234	7.3	22.5	67.5	92.7
28	125.8	2238	7.1	22.3	68.1	92.9
29	125.6	2242	6.9	22.2	68.7	93.1
30	125.4	2246	6.8	22.0	69.2	93.2
31	125.2	2250	6.6	21.9	69.8	93.4
32	124.9	2254	6.5	21.8	70.3	93.5
33	124.7	2257	6.3	21.6	70.8	93.7
34	124.6	2261	6.2	21.5	71.3	93.8
35	124.4	2264	6.0	21.4	71.8	94.0
36	124.2	2267	5.9	21.3	72.3	94.1
37	124.0	2271	5.8	21.2	72.8	94.2
38	123.9	2274	5.6	21.1	73.2	94.4
39	123.7	2277	5.5	21.0	73.7	94.5
40	123.5	2280	5.4	20.9	74.2	94.6
41	123.4	2282	5.3	20.8	74.6	94.7
42	123.2	2285	5.2	20.7	75.0	94.8
43	123.1	2288	5.0	20.6	75.5	95.0
44	123.0	2290	4.9	20.5	75.9	95.1
45	122.8	2293	4.8	20.4	76.3	95.2
46	122.7	2295	4.7	20.3	76.7	95.3
47	122.5	2298	4.6	20.2	77.1	95.4
48	122.4	2300	4.5	20.2	77.5	95.5
49	122.3	2302	4.4	20.1	77.9	95.6
50	122.2	2305	4.3	20.0	78.3	95.7

%4.5SBS katkılı (OBİ+0.5) ile yapılmış numunenin GSM sonuçları

EK-3 AB Karışımların GSM Tasarım Sonuçları

							Page 1
							Date : _____
Single Test diam. 150 mm							Technician : _____
							Project : _____
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	141.9	1948	23.4	30.7	23.8	76.6	
2	137.1	2017	20.7	28.2	26.8	79.3	
3	134.1	2061	18.9	26.7	29.0	81.1	
4	132.0	2093	17.6	25.5	30.8	82.4	
5	130.4	2119	16.6	24.6	32.3	83.4	
6	129.1	2141	15.8	23.8	33.7	84.2	
7	128.0	2159	15.1	23.2	34.9	84.9	
8	127.1	2174	14.5	22.6	36.1	85.5	
9	126.3	2188	13.9	22.1	37.1	86.1	
10	125.6	2200	13.4	21.7	38.0	86.6	
11	125.0	2211	13.0	21.3	38.9	87.0	
12	124.4	2222	12.6	20.9	39.8	87.4	
13	123.9	2231	12.2	20.6	40.6	87.8	
14	123.4	2240	11.9	20.3	41.4	88.1	
15	123.0	2248	11.6	20.0	42.2	88.4	
16	122.5	2255	11.3	19.7	42.9	88.7	
17	122.2	2262	11.0	19.5	43.6	89.0	
18	121.8	2269	10.7	19.2	44.2	89.3	
19	121.5	2275	10.5	19.0	44.8	89.5	
20	121.2	2281	10.3	18.8	45.5	89.7	
21	120.9	2287	10.0	18.6	46.1	90.0	
22	120.6	2292	9.8	18.4	46.6	90.2	
23	120.3	2297	9.6	18.2	47.2	90.4	
24	120.1	2302	9.4	18.1	47.8	90.6	
25	119.8	2306	9.3	17.9	48.3	90.7	
26	119.6	2311	9.1	17.8	48.8	90.9	
27	119.4	2315	8.9	17.6	49.3	91.1	
28	119.2	2319	8.8	17.5	49.8	91.2	
29	119.0	2323	8.6	17.3	50.3	91.4	
30	118.8	2327	8.5	17.2	50.7	91.5	
31	118.6	2330	8.3	17.1	51.2	91.7	
32	118.4	2334	8.2	16.9	51.7	91.8	
33	118.3	2337	8.1	16.8	52.1	91.9	
34	118.1	2340	7.9	16.7	52.6	92.1	
35	117.9	2343	7.8	16.6	53.0	92.2	
36	117.8	2346	7.7	16.5	53.4	92.3	
37	117.7	2349	7.6	16.4	53.8	92.4	
38	117.5	2352	7.5	16.3	54.2	92.5	
39	117.4	2355	7.3	16.2	54.6	92.7	
40	117.2	2358	7.2	16.1	55.0	92.8	
41	117.1	2360	7.1	16.0	55.4	92.9	
42	117.0	2363	7.0	15.9	55.7	93.0	
43	116.9	2365	6.9	15.8	56.1	93.1	
44	116.7	2368	6.8	15.7	56.4	93.2	
45	116.6	2370	6.8	15.6	56.8	93.2	
46	116.5	2372	6.7	15.6	57.2	93.3	
47	116.4	2375	6.6	15.5	57.5	93.4	
48	116.3	2377	6.5	15.4	57.8	93.5	
49	116.2	2379	6.4	15.3	58.2	93.6	
50	116.1	2381	6.3	15.3	58.5	93.7	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Saf (OBİ-0,5) bitüm ile yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROLS Your Partners							Page 1
Masters of Technology							Date : _____
Single Test diam. 150 mm							Technician : _____
							Project : _____
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m3	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	141.1	1971	21.3	30.6	30.4	78.7	
2	136.2	2043	18.4	28.1	34.4	81.6	
3	133.2	2089	16.6	26.4	37.3	83.4	
4	131.0	2123	15.2	25.2	39.7	84.8	
5	129.4	2151	14.1	24.3	41.8	85.9	
6	128.0	2173	13.2	23.4	43.7	86.8	
7	126.9	2193	12.4	22.8	45.5	87.6	
8	125.9	2210	11.7	22.2	47.1	88.3	
9	125.0	2225	11.1	21.6	48.6	88.9	
10	124.3	2239	10.6	21.1	50.0	89.4	
11	123.6	2251	10.1	20.7	51.3	89.9	
12	123.0	2263	9.6	20.3	52.6	90.4	
13	122.4	2273	9.2	19.9	53.8	90.8	
14	121.9	2283	8.8	19.6	54.9	91.2	
15	121.4	2291	8.5	19.3	56.0	91.5	
16	121.0	2300	8.2	19.0	57.1	91.8	
17	120.6	2307	7.8	18.7	58.1	92.2	
18	120.2	2314	7.6	18.5	59.1	92.4	
19	119.9	2321	7.3	18.2	60.1	92.7	
20	119.5	2327	7.0	18.0	60.9	93.0	
21	119.2	2333	6.8	17.8	61.8	93.2	
22	118.9	2339	6.6	17.6	62.7	93.4	
23	118.7	2344	6.4	17.4	63.5	93.6	
24	118.4	2349	6.2	17.2	64.3	93.8	
25	118.2	2354	6.0	17.1	65.1	94.0	
26	117.9	2359	5.8	16.9	65.8	94.2	
27	117.7	2363	5.6	16.8	66.5	94.4	
28	117.5	2367	5.4	16.6	67.2	94.6	
29	117.3	2372	5.3	16.5	68.0	94.7	
30	117.1	2376	5.1	16.3	68.7	94.9	
31	116.9	2379	5.0	16.2	69.3	95.0	
32	116.8	2383	4.8	16.1	69.9	95.2	
33	116.6	2386	4.7	16.0	70.6	95.3	
34	116.4	2389	4.6	15.8	71.2	95.4	
35	116.3	2392	4.4	15.7	71.8	95.6	
36	116.1	2396	4.3	15.6	72.4	95.7	
37	116.0	2399	4.2	15.5	73.0	95.8	
38	115.9	2401	4.1	15.4	73.5	95.9	
39	115.7	2404	4.0	15.3	74.0	96.0	
40	115.6	2407	3.9	15.2	74.5	96.1	
41	115.5	2409	3.8	15.1	75.1	96.2	
42	115.4	2411	3.7	15.1	75.5	96.3	
43	115.3	2414	3.6	15.0	76.0	96.4	
44	115.1	2416	3.5	14.9	76.5	96.5	
45	115.0	2418	3.4	14.8	77.0	96.6	
46	114.9	2420	3.3	14.7	77.4	96.7	
47	114.8	2423	3.2	14.7	77.9	96.8	
48	114.7	2425	3.2	14.6	78.4	96.8	
49	114.6	2427	3.1	14.5	78.8	96.9	
50	114.6	2429	3.0	14.5	79.3	97.0	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

Saf (OBİ+0,5) bitümlü yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROLS Your Partners							Page 1
Masters of Technology							Date : _____
Single Test diam. 150 mm							Technician : _____
							Project : _____
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	142.6	1941	23.3	31.2	25.3	76.7	
2	137.9	2007	20.7	28.8	28.3	79.3	
3	135.0	2050	19.0	27.3	30.5	81.0	
4	132.9	2082	17.7	26.2	32.3	82.3	
5	131.3	2109	16.7	25.2	33.9	83.3	
6	129.9	2130	15.8	24.5	35.3	84.2	
7	128.8	2149	15.1	23.8	36.6	84.9	
8	127.8	2165	14.4	23.2	37.8	85.6	
9	127.0	2180	13.9	22.7	38.9	86.1	
10	126.3	2192	13.4	22.3	40.0	86.6	
11	125.6	2204	12.9	21.8	40.9	87.1	
12	125.0	2215	12.5	21.5	41.9	87.5	
13	124.4	2225	12.1	21.1	42.8	87.9	
14	123.9	2234	11.7	20.8	43.6	88.3	
15	123.4	2242	11.4	20.5	44.4	88.6	
16	123.0	2250	11.1	20.2	45.2	88.9	
17	122.6	2258	10.8	19.9	45.9	89.2	
18	122.2	2265	10.5	19.7	46.7	89.5	
19	121.9	2271	10.2	19.5	47.4	89.8	
20	121.5	2277	10.0	19.2	48.0	90.0	
21	121.2	2283	9.8	19.0	48.7	90.2	
22	120.9	2289	9.5	18.8	49.3	90.5	
23	120.6	2294	9.3	18.6	50.0	90.7	
24	120.4	2299	9.1	18.5	50.5	90.9	
25	120.1	2304	8.9	18.3	51.1	91.1	
26	119.9	2309	8.8	18.1	51.7	91.2	
27	119.7	2313	8.6	18.0	52.2	91.4	
28	119.5	2317	8.4	17.8	52.7	91.6	
29	119.2	2321	8.3	17.7	53.3	91.7	
30	119.0	2325	8.1	17.5	53.8	91.9	
31	118.8	2329	8.0	17.4	54.3	92.0	
32	118.7	2332	7.8	17.3	54.7	92.2	
33	118.5	2336	7.7	17.2	55.2	92.3	
34	118.3	2339	7.5	17.0	55.7	92.5	
35	118.1	2343	7.4	16.9	56.2	92.6	
36	118.0	2346	7.3	16.8	56.6	92.7	
37	117.8	2349	7.2	16.7	57.1	92.8	
38	117.7	2352	7.1	16.6	57.5	92.9	
39	117.5	2355	6.9	16.5	57.9	93.1	
40	117.4	2358	6.8	16.4	58.4	93.2	
41	117.3	2361	6.7	16.3	58.8	93.3	
42	117.1	2363	6.6	16.2	59.2	93.4	
43	117.0	2366	6.5	16.1	59.6	93.5	
44	116.9	2368	6.4	16.0	60.0	93.6	
45	116.8	2371	6.3	15.9	60.4	93.7	
46	116.6	2373	6.2	15.9	60.7	93.8	
47	116.5	2375	6.1	15.8	61.1	93.9	
48	116.4	2377	6.0	15.7	61.5	94.0	
49	116.3	2379	6.0	15.6	61.8	94.0	
50	116.2	2382	5.9	15.5	62.2	94.1	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%3NPP katkılı OBİ bitümlle yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROL		Your Partners					Page 1
Masters of Technology		Single Test diam. 150 mm		Date :			
				Technician :			
				Project :			
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m3	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	142.4	1936	24.1	31.0	22.3	75.9	
2	137.6	2003	21.4	28.6	25.1	78.6	
3	134.7	2046	19.7	27.1	27.1	80.3	
4	132.6	2078	18.5	25.9	28.7	81.5	
5	131.0	2103	17.5	25.0	30.1	82.5	
6	129.7	2124	16.7	24.3	31.3	83.3	
7	128.7	2142	16.0	23.6	32.4	84.0	
8	127.7	2157	15.4	23.1	33.4	84.6	
9	127.0	2171	14.9	22.6	34.3	85.1	
10	126.3	2183	14.4	22.2	35.2	85.6	
11	125.6	2194	14.0	21.8	36.0	86.0	
12	125.1	2204	13.6	21.4	36.8	86.4	
13	124.5	2213	13.2	21.1	37.5	86.8	
14	124.1	2222	12.9	20.8	38.2	87.1	
15	123.6	2230	12.6	20.5	38.9	87.4	
16	123.2	2237	12.3	20.3	39.5	87.7	
17	122.8	2244	12.0	20.0	40.1	88.0	
18	122.5	2250	11.7	19.8	40.7	88.3	
19	122.1	2257	11.5	19.6	41.3	88.5	
20	121.8	2262	11.3	19.4	41.8	88.7	
21	121.5	2268	11.0	19.2	42.3	89.0	
22	121.2	2273	10.8	19.0	42.9	89.2	
23	121.0	2278	10.6	18.8	43.4	89.4	
24	120.7	2283	10.4	18.6	43.9	89.6	
25	120.5	2288	10.3	18.5	44.4	89.7	
26	120.2	2292	10.1	18.3	44.8	89.9	
27	120.0	2296	9.9	18.1	45.3	90.1	
28	119.8	2300	9.8	18.0	45.7	90.2	
29	119.6	2304	9.6	17.9	46.2	90.4	
30	119.4	2308	9.5	17.7	46.6	90.5	
31	119.2	2312	9.3	17.6	47.0	90.7	
32	119.0	2315	9.2	17.5	47.4	90.8	
33	118.9	2318	9.1	17.4	47.8	90.9	
34	118.7	2322	8.9	17.2	48.2	91.1	
35	118.5	2325	8.8	17.1	48.6	91.2	
36	118.4	2328	8.7	17.0	48.9	91.3	
37	118.2	2331	8.6	16.9	49.3	91.4	
38	118.1	2334	8.5	16.8	49.7	91.5	
39	118.0	2336	8.4	16.7	50.0	91.6	
40	117.8	2339	8.3	16.6	50.3	91.7	
41	117.7	2341	8.2	16.5	50.7	91.8	
42	117.6	2344	8.1	16.4	51.0	91.9	
43	117.4	2347	8.0	16.4	51.3	92.0	
44	117.3	2349	7.9	16.3	51.7	92.1	
45	117.2	2352	7.8	16.2	52.0	92.2	
46	117.1	2354	7.7	16.1	52.3	92.3	
47	117.0	2356	7.6	16.0	52.6	92.4	
48	116.9	2358	7.5	15.9	52.9	92.5	
49	116.8	2360	7.4	15.9	53.2	92.6	
50	116.7	2363	7.3	15.8	53.5	92.7	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%3NPP katkılı (OBİ-0,5) bitümlü yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROL		Your Partners				
Masters of Technology		Single Test diam. 150 mm		Date : _____		
				Technician : _____		
				Project : _____		
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m3	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	139.9	1986	20.9	29.9	30.1	79.1
2	135.1	2058	18.1	27.4	34.1	81.9
3	132.0	2105	16.2	25.7	37.1	83.8
4	129.8	2141	14.8	24.5	39.7	85.2
5	128.1	2170	13.6	23.5	42.0	86.4
6	126.7	2194	12.7	22.6	44.0	87.3
7	125.5	2215	11.8	21.9	45.9	88.2
8	124.5	2233	11.1	21.2	47.7	88.9
9	123.6	2249	10.5	20.7	49.4	89.5
10	122.8	2263	9.9	20.2	50.9	90.1
11	122.1	2276	9.4	19.7	52.4	90.6
12	121.5	2288	8.9	19.3	53.8	91.1
13	120.9	2299	8.5	18.9	55.2	91.5
14	120.4	2309	8.1	18.6	56.4	91.9
15	119.9	2318	7.7	18.2	57.7	92.3
16	119.5	2326	7.4	17.9	58.9	92.6
17	119.0	2335	7.1	17.6	60.0	92.9
18	118.7	2342	6.8	17.4	61.1	93.2
19	118.3	2349	6.5	17.1	62.2	93.5
20	118.0	2356	6.2	16.9	63.2	93.8
21	117.7	2362	6.0	16.7	64.2	94.0
22	117.4	2368	5.7	16.5	65.2	94.3
23	117.1	2374	5.5	16.3	66.2	94.5
24	116.9	2378	5.3	16.1	67.0	94.7
25	116.6	2383	5.1	15.9	67.9	94.9
26	116.4	2387	5.0	15.8	68.6	95.0
27	116.2	2392	4.8	15.6	69.5	95.2
28	116.0	2396	4.6	15.5	70.2	95.4
29	115.8	2400	4.5	15.4	70.9	95.5
30	115.7	2403	4.3	15.2	71.6	95.7
31	115.5	2406	4.2	15.1	72.2	95.8
32	115.4	2409	4.1	15.0	72.8	95.9
33	115.2	2412	4.0	14.9	73.4	96.0
34	115.1	2415	3.8	14.8	74.0	96.2
35	115.0	2418	3.7	14.7	74.6	96.3
36	114.8	2420	3.6	14.6	75.1	96.4
37	114.7	2423	3.5	14.5	75.6	96.5
38	114.6	2425	3.5	14.5	76.1	96.5
39	114.5	2427	3.4	14.4	76.6	96.6
40	114.4	2429	3.3	14.3	77.1	96.7
41	114.3	2431	3.2	14.2	77.5	96.8
42	114.2	2433	3.1	14.2	78.0	96.9
43	114.1	2435	3.0	14.1	78.4	97.0
44	114.1	2437	3.0	14.0	78.8	97.0
45	114.0	2438	2.9	14.0	79.1	97.1
46	113.9	2440	2.9	13.9	79.5	97.1
47	113.8	2442	2.8	13.9	79.9	97.2
48	113.8	2443	2.7	13.8	80.3	97.3
49	113.7	2444	2.7	13.8	80.6	97.3
50	113.6	2446	2.6	13.7	80.9	97.4


Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%3NPP katkılı (OBİ+0,5) bitümlü yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROLS Your Partners							Page 1
Masters of Technology							Date : _____
Single Test diam. 150 mm							Technician : _____
							Project : _____
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m3	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %	
1	141.0	1963	22.5	30.3	25.7	77.5	
2	136.4	2029	19.9	28.0	28.8	80.1	
3	133.6	2072	18.3	26.5	31.1	81.7	
4	131.5	2104	17.0	25.3	33.0	83.0	
5	129.9	2130	16.0	24.4	34.7	84.0	
6	128.6	2151	15.1	23.7	36.1	84.9	
7	127.6	2170	14.4	23.0	37.5	85.6	
8	126.6	2186	13.8	22.4	38.7	86.2	
9	125.8	2200	13.2	21.9	39.9	86.8	
10	125.0	2213	12.7	21.5	41.0	87.3	
11	124.4	2225	12.2	21.1	42.0	87.8	
12	123.8	2235	11.8	20.7	43.0	88.2	
13	123.3	2245	11.4	20.3	43.9	88.6	
14	122.8	2254	11.1	20.0	44.8	88.9	
15	122.3	2262	10.7	19.7	45.6	89.3	
16	121.9	2270	10.4	19.4	46.4	89.6	
17	121.5	2278	10.1	19.2	47.2	89.9	
18	121.1	2285	9.9	18.9	47.9	90.1	
19	120.8	2291	9.6	18.7	48.7	90.4	
20	120.5	2297	9.4	18.5	49.3	90.6	
21	120.2	2303	9.1	18.3	50.0	90.9	
22	119.9	2308	8.9	18.1	50.7	91.1	
23	119.6	2313	8.7	17.9	51.3	91.3	
24	119.4	2318	8.5	17.8	51.9	91.5	
25	119.1	2323	8.3	17.6	52.5	91.7	
26	118.9	2327	8.2	17.4	53.1	91.8	
27	118.7	2331	8.0	17.3	53.6	92.0	
28	118.5	2336	7.8	17.1	54.2	92.2	
29	118.3	2340	7.7	17.0	54.8	92.3	
30	118.1	2344	7.5	16.8	55.3	92.5	
31	117.9	2347	7.4	16.7	55.8	92.6	
32	117.7	2351	7.3	16.6	56.3	92.7	
33	117.6	2354	7.1	16.5	56.8	92.9	
34	117.4	2357	7.0	16.4	57.3	93.0	
35	117.2	2361	6.9	16.2	57.8	93.1	
36	117.1	2364	6.7	16.1	58.2	93.3	
37	116.9	2366	6.6	16.0	58.6	93.4	
38	116.8	2369	6.5	15.9	59.1	93.5	
39	116.7	2372	6.4	15.8	59.5	93.6	
40	116.5	2375	6.3	15.7	59.9	93.7	
41	116.4	2377	6.2	15.7	60.3	93.8	
42	116.3	2380	6.1	15.6	60.7	93.9	
43	116.2	2382	6.0	15.5	61.2	94.0	
44	116.1	2385	5.9	15.4	61.6	94.1	
45	116.0	2387	5.8	15.3	61.9	94.2	
46	115.8	2389	5.7	15.2	62.3	94.3	
47	115.7	2391	5.7	15.2	62.6	94.3	
48	115.6	2393	5.6	15.1	63.0	94.4	
49	115.6	2395	5.5	15.0	63.3	94.5	
50	115.5	2397	5.4	15.0	63.7	94.6	

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%5NPP katkılıOBİ bitümle yapılmış numunenin GSM sonuçları

						
Masters of Technology						
Single Test diam. 150 mm						
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	142.1	1945	23.8	30.6	22.3	76.2
2	137.5	2010	21.3	28.3	24.9	78.7
3	134.8	2051	19.7	26.8	26.8	80.3
4	132.7	2083	18.4	25.7	28.4	81.6
5	131.2	2108	17.4	24.8	29.8	82.6
6	129.9	2128	16.6	24.1	31.0	83.4
7	128.8	2146	15.9	23.5	32.1	84.1
8	127.9	2161	15.3	22.9	33.1	84.7
9	127.1	2175	14.8	22.4	34.0	85.2
10	126.4	2187	14.3	22.0	34.9	85.7
11	125.8	2198	13.9	21.6	35.7	86.1
12	125.2	2208	13.5	21.2	36.4	86.5
13	124.7	2218	13.1	20.9	37.2	86.9
14	124.2	2226	12.8	20.6	37.9	87.2
15	123.7	2234	12.5	20.3	38.6	87.5
16	123.3	2242	12.2	20.1	39.2	87.8
17	122.9	2249	11.9	19.8	39.8	88.1
18	122.6	2255	11.7	19.6	40.4	88.3
19	122.2	2262	11.4	19.3	41.0	88.6
20	121.9	2268	11.2	19.1	41.6	88.8
21	121.6	2273	11.0	18.9	42.1	89.0
22	121.4	2278	10.8	18.8	42.6	89.2
23	121.1	2283	10.6	18.6	43.1	89.4
24	120.8	2288	10.4	18.4	43.6	89.6
25	120.6	2293	10.2	18.2	44.1	89.8
26	120.3	2297	10.0	18.1	44.6	90.0
27	120.1	2302	9.8	17.9	45.1	90.2
28	119.9	2306	9.7	17.8	45.5	90.3
29	119.7	2310	9.5	17.6	46.0	90.5
30	119.5	2314	9.4	17.5	46.4	90.6
31	119.3	2317	9.2	17.4	46.8	90.8
32	119.1	2321	9.1	17.2	47.2	90.9
33	119.0	2324	9.0	17.1	47.6	91.0
34	118.8	2327	8.8	17.0	48.0	91.2
35	118.6	2330	8.7	16.9	48.3	91.3
36	118.5	2333	8.6	16.8	48.7	91.4
37	118.3	2336	8.5	16.7	49.1	91.5
38	118.2	2339	8.4	16.6	49.5	91.6
39	118.0	2342	8.3	16.5	49.9	91.7
40	117.9	2345	8.2	16.4	50.2	91.8
41	117.8	2347	8.1	16.3	50.5	91.9
42	117.7	2350	8.0	16.2	50.8	92.0
43	117.5	2353	7.9	16.1	51.2	92.1
44	117.4	2355	7.8	16.0	51.5	92.2
45	117.3	2357	7.7	15.9	51.9	92.3

Page 1

Date : _____

Technician : _____

Project : _____

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%5NPP katkılı (OBİ-0,5) bitümlü yapılmış numunenin GSM sonuçları

CONTROL		Your Partners				
Masters of Technology				Page 1		
Single Test diam. 150 mm				Date : _____		
				Technician : _____		
				Project : _____		
ICT Cycles	Height mm	Density kg/m3	Void %	VMA %	VFB %	Gmm %
1	137.3	2022	19.6	28.6	31.5	80.4
2	132.5	2095	16.7	26.1	35.8	83.3
3	129.7	2140	15.0	24.5	38.9	85.0
4	127.7	2173	13.6	23.3	41.5	86.4
5	126.2	2200	12.5	22.3	43.8	87.5
6	124.9	2223	11.6	21.5	45.9	88.4
7	123.8	2242	10.9	20.9	47.9	89.1
8	122.9	2259	10.2	20.3	49.6	89.8
9	122.1	2274	9.6	19.7	51.3	90.4
10	121.3	2288	9.1	19.3	52.9	90.9
11	120.7	2300	8.6	18.8	54.4	91.4
12	120.1	2311	8.1	18.4	55.8	91.9
13	119.6	2321	7.7	18.1	57.2	92.3
14	119.1	2331	7.4	17.7	58.5	92.6
15	118.7	2339	7.0	17.4	59.7	93.0
16	118.3	2347	6.7	17.1	60.9	93.3
17	117.9	2355	6.4	16.9	62.1	93.6
18	117.5	2362	6.1	16.6	63.2	93.9
19	117.2	2369	5.9	16.4	64.3	94.1
20	116.9	2375	5.6	16.2	65.3	94.4
21	116.6	2381	5.4	16.0	66.3	94.6
22	116.3	2386	5.2	15.8	67.3	94.8
23	116.1	2391	4.9	15.6	68.3	95.1
24	115.8	2396	4.7	15.4	69.2	95.3
25	115.6	2401	4.6	15.2	70.1	95.4
26	115.4	2406	4.4	15.1	70.9	95.6
27	115.2	2410	4.2	14.9	71.8	95.8
28	115.0	2414	4.0	14.8	72.7	96.0
29	114.8	2418	3.9	14.6	73.5	96.1
30	114.6	2422	3.7	14.5	74.3	96.3
31	114.5	2425	3.6	14.4	75.0	96.4
32	114.3	2429	3.5	14.3	75.7	96.5
33	114.1	2432	3.3	14.2	76.5	96.7
34	114.0	2435	3.2	14.1	77.1	96.8
35	113.9	2438	3.1	14.0	77.8	96.9
36	113.7	2441	3.0	13.8	78.5	97.0
37	113.6	2444	2.9	13.7	79.1	97.1
38	113.5	2446	2.8	13.7	79.7	97.2
39	113.4	2449	2.7	13.6	80.3	97.3
40	113.3	2451	2.6	13.5	80.9	97.4
41	113.2	2453	2.5	13.4	81.4	97.5
42	113.1	2455	2.4	13.3	82.0	97.6
43	113.0	2457	2.3	13.3	82.5	97.7
44	112.9	2460	2.2	13.2	83.1	97.8
45	112.8	2462	2.2	13.1	83.6	97.8
46	112.7	2463	2.1	13.1	84.0	97.9
47	112.6	2465	2.0	13.0	84.5	98.0
48	112.5	2467	1.9	12.9	84.9	98.1
49	112.4	2469	1.9	12.9	85.5	98.1
50	112.4	2470	1.8	12.8	85.8	98.2

Processed with Controls ICT Gyrocomp gyratory compactor

%5NPP katkılı (OBİ+0,5) bitümlü yapılmış numunenin GSM sonuçları