



**T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**Polipropilen Pirolizi Kullanılarak Yapılan Taş
Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri**

Khalil Ahmad Sultani

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Khalil Ahmad SULTANI tarafından hazırlanan “Polipropilen Pirolizi Kullanılarak Yapılan Taş Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri” adlı tez çalışması 07/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ 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. Saadettin Erhan KESEN
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.

Khalil Ahmad Sultani

Tarih: 07.07.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Polipropilen Pirolizi Kullanılarak Yapılan Taş Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri

Khalil Ahmad Sultani

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

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Yıl, 2021,109 Sayfa

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

Son zamanlarda dünyada sanayileşme, nüfus ve tüketimin giderek artması, sonucunda yeni kaynaklar bulma konusunda sorunlar da artmıştır. Doğal kaynaklarda meydana gelen hızlı tüketim ise gelecek kaygısına neden olmuş ve bu nedenle ortaya çıkan atık malzemeleri değerlendirmek önemli hale gelmiştir. Atık malzemeleri değerlendirmek hem çevre açısından hem de ekonomik anlamda önemli derecede fayda sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında bu etkiler göz önüne alınarak atık polipropilen piroliz (PPP) yöntemi ile geri kazanılmış Taş Mastik Asfalt (TMA) içerisine katılmış ve karışımın Marshall özellikleri incelenmiştir.

Bu amaçla çalışmada atık polipropilen (PP) piroliz edilmiş ve piroliz ürünü (katı, sıvı ve gaz) oranları hesaplanmıştır. Piroliz sonucunda elde edilen katı ürün saf 50/70 penetrasyonlu bitüme %5 oranında katılarak modifiye bitüm elde edilmiştir. Katkıların saf bitüme etkisini incelemek amacıyla; penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmış ve saf 50/70 bitüm ve %4.5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile karşılaştırma yapılmıştır. Modifiye edilmiş bitümler saf bitüme göre penetrasyonları azaldığı ve yumuşama noktaları arttığı görülmüştür.

Çalışmada üç farklı karışım tipi; %5 PPP ile modifiye edilmiş bitüm, %4,5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ve modifiye edilmemiş (saf 50/70 bitüm) bitüm ile Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlar hazırlanmıştır. Elde edilen modifiye bitüm ve saf bitüm ile hazırlanan karışımların-her birinden 18 adet briket Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda optimum bitüm oranları sırasıyla %6,3, %6,6 ve %6,2 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm oranına göre değerlendirildiğinde Marshall Stabilitate değerlerinde yakın değerler elde edilmiş ama hava boşluğunda ve akma değerlerinde farklılıklar görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Taş Mastik Asfalt, Polipropilen, Plastik atık, Piroliz, Modifiye bitüm.

ABSTRACT

MS THESIS

The Marshall Characteristics of Stone Mastic Asphalt Mixtures made by Pyrolysis Polypropylene

Khalil Ahmad Sultani

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

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2021,109Pages

Jury

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Assoc. Prof. Dr Tacettin GEÇKİL
Asst. Prof. Dr. Deniz ARSLAN**

Recently, industrialization, population and consumption have been increasing in the world as a result problems in finding new resources have increased. The rapid consumption of natural resources causes future concerns and therefore it has become important to utilize the waste materials generated. Utilizing waste materials will provide significant benefits both environmentally and economically. The scope of this thesis, taking into account these effects, waste polypropylene was pyrolyzed and Marshall Properties were investigated.

In this study, waste polypropylene (PP) was pyrolyzed and the proportions of pyrolysis products (solid, liquid and gas) were calculated. Modified bitumen was prepared by mixing pyrolysis solid product with pure 50/70 bitumen in 5% rate. In order to examine the effect of additives on pure bitumen; Penetration and softening tests were carried out and compared with pure 50/70 bitumen and modified bitumen with 4.5% SBS. It was observed that the penetrations of the modified bitumen decreased and the softening points increased compared to the pure bitumen.

Three different types of mixtures in the study; Mixtures of bitumen modified with 5% PPP, bitumen modified with 4.5% SBS and unmodified (pure 50/70 bitumen) were prepared. 18 briquettes were prepared from each of the modified and unmodified mixtures obtained and subjected to Marshall Test. At the end of the experiment, optimum bitumen ratios were found as 6.3%, 6.6% and 6.2%, respectively. Considering the Marshall Test properties according to the optimum bitumen, the stability values are almost the same, but there is a difference in the air gap and flow values.

Keywords: Stone Mastic Asphalt, polypropylene, Waste plastic, pyrolysis, Modified bitumen.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmam boyunca desteğini benden esirgemeyen, zorlandığım durumlarda bana yol göstererek çalışmamın önünü açan Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK Hocama saygı ve şükranlarımı sunarım.

Laboratuar çalışmam boyunca ve tez hazırlama sürecinde ne zaman sorunla karşılaşsam hep kapısını açan bana yol gösteren değerli hocalarım Arş. Gör. Dr. Muhammet Mevlüt AKMAZ ve Arş. Gör. Hüseyin KÖSE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca maddi, manevi ve motivasyon kaynağım değerli arkadaşım İnşaat Mühendisi Mohammad Yatim SAMİM'a en içten teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde çok emeği olan ve hiç fedakârlığını esirgemeyen maddi, manevi desteklerini her zaman hissettiğim ve beni yalnız bırakmayan annem, babam ve kardeşlerimi en içten kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Khalil Ahmad SULTANİ
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti çalışması	2
1.2. Tezin amacı	6
1.3. Plastiklerin Türleri ve Sektörlere Göre Dağılımı	7
1.4. Plastiklerde Geri Dönüşüm ve Kazanım	9
1.5. Polipropilen (PP).....	12
2. KARAYOLU YAPISI VE ÜSTYAPIYA BİR BAKIŞ	14
2.1. Rijit Üstyapı	14
2.2. Esnek Üstyapı.....	15
2.3. Karayolu Esnek Üstyapısının Projelendirilmesi	16
2.4. Kaplama Tipi Seçimi.....	19
2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlar.....	20
2.5.1. Bitümlü Sıcak Karışım Tipleri.....	21
2.5.2. Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri ve Performansını Etkileyen Faktörler	22
2.5.3. Esnek üstyapılarda Meydana Gelen Bozulmalar	27
2.6. Taş Mastik Asfalt Karışımlara Genel Bakış.....	37
2.6.1. Taş Mastik Asfalt Tanımı ve tarihçesi	37
2.6.2. Taş mastik Asfaltın kullanımı ve uygulama alanları	41
2.6.3. TMA'nın Avantajları;.....	43
2.6.4. TMA'nın Dezavantajları;.....	45
2.6.5. Taş Mastik Asfalt Karışımlarının Üretimi	45
2.6.6. TMA Karışımların Serilmesi ve Sıkıştırılması	47
2.6.7. Taş Mastik Asfalt Karışım Dizaynı	48
2.6.8. TMA'nin Hacimsel Yapısı.....	50
2.6.9. TMA'da Kaba ve İnce agrega.....	51
2.6.10. Mineral filler	53
2.6.11. Bitümlü Bağlayıcılar	53
2.6.12. Elyaf lar	54
2.6.13. TMA Kalite Kontrol.....	55
2.6.14. TMA Kaplama Maliyeti	56
3. MATERYAL ve YÖNTEM	58
3.1. Agrega	58
3.1.1. Bazalt Agrega	59

3.2.	Bitümlü Bağlayıcı	59
3.3.	Selülozik Elyaf.....	61
3.4.	SBS (Stiren-Butadien-Stiren) veya Kraton	62
3.5.	Agrega Deneyler	63
3.5.1.	Elek analizi deneyi (TS EN 933-1).....	63
3.5.2.	Los Angeles Aşınma Deneyi (TS EN 1097-2:1998)	64
3.5.3.	Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi (TS EN 1097-6)	66
3.5.4.	Yassılık İndeksi Deneyi	71
3.6.	Bitüm Deneyleri	72
3.6.1.	Özgül Ağırlık Deneyi (TS EN 15326 – ASTM D70).....	72
3.6.2.	Bitüm Penetrasyon Deneyi (TS EN 1426).....	73
3.6.3.	Yumuşama Noktası Deneyi (TS EN 1427).....	74
3.6.4.	Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi (TS EN 12697-18).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
3.7.	Piroliz Deney Sistemi.....	75
3.8.	Modifiye bitüm üretimi	78
3.9.	Marshall Tasarım Yöntemi (TS 12697-30).....	80
3.10.	Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi (TS EN 12697-18).....	87
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	88
4.1.	Agrega Deneyleri	88
4.1.1.	Elek Analiz Deneyi ve Gradasyon Eğrisinin Çizimi	88
4.1.2.	Agrega deney sonuçları	89
4.2.	Piroliz deneyinden elde edilen katkı maddesi.....	89
4.2.1.	Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilmesi.....	91
4.3.	Bitüm Deneyleri.....	93
4.4.	Marshall Karışım Dizaynı.....	93
5.	Sonuç ve Öneriler.....	104
	Kaynaklar	106

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
AC	: Asfalt çimentosu
DTT	: Dolaylı çekme testi (deneyi)
DYPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
EBA	: Etilen bütıl akrilat
ETDY	: Eş değeri tekerlek dingil yükü
EVA	: Etilen vinil asetat
HWT	: Hamburg tekerlek izi (Hamburg wheel tracking)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LDYPE	: Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen
OBC	: Optimum bağlayıcı içeriğı
PBK	: Polibutadien kauçuk
PBT	: Polibütıl tereftalat
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PEPU	: Polieter poliüretan
PET	: Polietilen tereftalat
PMA	: Polimer modifiye asfalt
PMB	: Polimer modifiye bitüm
PP	: Polipropilen
PPA	: Polifosforik asit
SBS	: Stiren bütadien stiren
SMA	: Stone mastic asphlat
TMA	: Taş mastik asfalt
WTR	: Atık lastik
YYPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
YYPHP	: Yüksek yoğunluklu polietilen homo polimer

1. GİRİŞ

Bir ülkenin ulaşım altyapılarının gelişmişliği o ülkenin genel gelişmişliği ile doğru orantılıdır. Ulaştırma, karayolu, havayolu, deniz yolu ve demir yolu olarak ayrılmaktadır. Günümüzde karayolu ulaşım sistemi diğer taşıma türlerine göre daha fazla tercih edilmesi, üretim yerinden tüketim mahalline aktarmasız ve hızlı taşıma yapabilmesidir. Bir ülkenin ulaşım sistemi insan vücudundaki damarların dolaşım sistemine benzetilebilir. Havayolları, denizyolları ve demiryolları ana damarlardır. Karayolu kapıdan kapıya bir ulaşım hizmeti sağladığı için ülkenin kılcal damarları temsil eder. Bu nedenden dolayı karayolları yoğun ve ağır trafik yüklerine maruz kalmaktadır. Üstyapıya meydana gelen gerilmelerdeki artış, karayolu esnek üstyapısında bozulmalara ve hizmet ömrü kabiliyetinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun dışında esnek üstyapıda kullanılan malzemeler, farklı iklim şartları altında dayanımlarını koruyamadığından yine yol kullanım ömründe azalmalar meydana gelmektedir.

Böyle durumlarda ulaşım ağının devamlılığı açısından bakım ve onarım işlemleri yapılması zorunlu hale gelecektir. Bu durum ise ekonomiye ek bir maliyet olarak karşımıza çıkacaktır. Bu ek maliyetlere önlem almak ve yol ömrünün uzatılması amacıyla esnek üstyapının performansını artırıcı katkılar ve yöntemler ortaya çıkmıştır. Buna paralel olarak son yıllarda Türkiye’de de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlayan Taş Mastik Asfalt (TMA) kaplamalar, yol üstyapısının maruz kaldığı bozulmalara neden olan olumsuz etkilere karşı daha yüksek direnç göstermektedir. TMA karışımlar yol üstyapısının maruz kaldığı bu etkilere direnç gösterebilse bile bazen yetersiz kaldığı ve olumsuz sonuçların oluştuğu durumlar da meydana gelmektedir. Böyle durumlar için ülke ulaşım ağının büyük bir bölümünü kapsayan ve ekonomik açıdan da büyük bir paya sahip olan karayollarının, bakım ve onarım maliyetlerini azaltmak amacıyla yeni ve daha maliyeti ucuz yöntemler araştırılmalıdır. Bu yöntemlerin yerli ve milli olması ve ülke kaynaklarının kullanılması da büyük önem arz etmektedir (Kabadayı, 2019).

Bu görüşe paralel olarak agrega ve atık polipropilen Türkiye’de yaygın bir şekilde bulunmaktadır ve bu çalışmada modifiye olarak bitümlü bağlayıcı içerisinde atık polipropilen kullanıp TMA karışımların performansına nasıl etki yaptığı araştırılmıştır. Atık polipropilen kullanımı sadece karışımın performansını artırmak için değil, aynı zamanda çevre kirliliğini önlemek ve değerlendirilmemiş kaynakların kullanılmasında da büyük bir rol oynar.

1.1. Literatür Özet çalışması

Taş Mastik Asfalt (TMA), tekerlek izine dayanıklı iri agregadan oluşmuş bir yapı ile boşlukları dolduran ince agrega-filler-bitüm harcının (mastik harç) karışımıdır. TMA aşınma tabakaları genel olarak % 70-80 kaba agrega, % 20-30 ince agrega ve % 6-7 gibi oldukça fazla bitümlü bağlayıcı içeren kesikli gradasyona sahip asfalt karışımlardan imal edilmektedir. TMA karışımlarda kullanılan kaba agrega asfalt betonunda kullanılan kaba agregaya nazaran daha sağlam ve filler yüzdesi daha fazla olup yüksek bitüm içeriğini sağlamak ve bitümün drene olmasını önlemek amacıyla elyaf (fiber) türü stabilizör katkı kullanılmaktadır. Ayrıca TMA kesikli gradasyona sahip olduğundan dolayı boşluklar, mastik (yani bitüm+filler+ince agreganın küçük boyutlu kısımları) ile doldurulmaktadır (Arslan, 2014).

Taş Mastik Asfalt (TMA) kaplama karışımların performansını artırmak için modifiye bitüm kullanılmaktadır, modifiye bitüm karışımın performansında önemli bir rol oynamaktadır. Çoğu araştırmada, modifiye bitüm performansı üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Bunun için farklı modifiye malzemeler kullanılarak asfalt karışımın performansı üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Son yıllarda, araç sayısı ile trafik hızı ve yükü önemli ölçüde artmıştır. Bu ani ve bir şekilde plansız aşırı yüklenme, kaplamaların ömrünü büyük ölçüde azaltılmış, bakım, onarım maliyetlerini ve kullanıcılar için riskleri de artırmıştır. Yol ağlarının bozulmasını sınırlı tutmak için, bitümlü bağlayıcılara polimer ilavesiyle kaplamaların kalitesi ve performansı iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Polimer modifiye asfaltlar (PMA) yirminci yüzyılın ikinci yarısında önem kazanmıştır ve şimdi asfalt kaplama alanında temel bir rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklık ve yüksek kesmeli karıştırma ile bitüm ve polimer; bitüm molekülleriyle birleşir, böylece tüm bağlayıcıyı içeren yutulmuş bir ağ oluşturur ve değiştirilmemiş bağlayıcıya kıyasla viskoelastik özelliklerde önemli bir gelişme sağlar (Polacco ve ark, 2015).

Akmaz (2020) yaptığı çalışmada polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polietilen tereftalat (PET) farklı atık plastikleri belirli oranlarda karıştırılmış, belirlemiş olduğu atık plastiklerin ikili ve üçlü şekilde plastik karışım grupları piroliz edilmiş ve piroliz ürün (katı, sıvı ve gaz) verimleri hesaplanmıştır. Piroliz katı ürünleri, saf 50/70 bitümle %2, %4, %5 ve %6 oranlarında karıştırılarak modifiye bitümler elde edilmiştir. Hazırlanmış olduğu katkıların saf bitüme etkisini

incelemek için; penetrasyon, yumuşama noktası ve RV (dönel viskometre) deneyleri yapılmıştır. Katkıların ilavesiyle, bitümün penetrasyonunun azaldığı ve yumuşama noktasının arttığı belirtilmiştir. Saf bitüme göre; 60 ve 75°C’lerdeki viskozitelerin tüm katkılı bitümlerde arttığı, 90°C’den itibaren YYPE–PET katkılı bitümlerde ve 120°C’den itibaren PP–YYPE–PET katkılı bitümlerde viskozitelerin azaldığı, PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerde tüm sıcaklıklarda viskozitelerin arttığı tespit edilmiştir. Modifiye edilmiş bitümlerde, saf bitüme göre viskozite değişim yüzdelерinin düşük sıcaklıklarda daha yüksek seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Katkı verimleri, modifikasyon, penetrasyon, yumuşama noktası ve RV çalışmaları ile PP–YYPE ve PP–PET katkıları seçilmiş, bu katkıların optimum oranları %5 olarak bulunmuştur. Katkıların eklenmesi ile Marshall stabilite değerlerinin arttığı ve tekerlek izi karşısında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Akmaz, 2020).

Al–Hadidy ve Yi–qiu (2009) yaptıkları çalışmada; esnek kaplamada, bitüm ve TMA karışımların modifiye edilmesinin faydalarını araştırmışlardır. 50/60 penetrasyon dereceli bitüm ve dört oranda düşük yoğunluklu polietilenin piroliz (DYPEP) seçilmiştir. Saf ve katkılı bitümlü bağlayıcılar, reolojik ve homojenlik testlerine tabi tutulmuştur. Saf ve modifiye TMA karışımları üzerinde, Marshall stabilitesi, çekme ve basınç mukavemeti dâhil performans testleri gerçekleştirilmiştir. Performans testleri arasında regresyon ilişkileri elde edilmiştir. TMA modifikasyonu nedeniyle, aynı servis ömrü için TMA ve taban katmanının kalınlığını azaltmak veya kaplamanın servis ömründeki iyileşmeyi tahmin etmek için mekanik–ampirik bir tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. DYPE katkılı asfalt karışımların performansının, saf karışımlara kıyasla daha iyi olduğu test sonuçlarıyla görülmüştür. Sıcaklığa duyarlılık DYPE'nin asfalt karışıma dâhil edilmesiyle azaltılmış ve araştırılan benzer asfalt karışımının performansının iyileştirilmesi için, bitüm ağırlığına göre %5'lik bir DYPE içeriği önerilmiştir. Bir yüzey katmanı olarak DYPE katkılı TMA'dan oluşan kaplamanın yapı malzemelerinin azaltılmasında faydalı olduğunu, çok katmanlı elastik analiz sonuçları göstermiştir.

Ahmadinia ve ark (2011) atık plastik şişelerin (Polietilen Tereftalat (PET)) Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımın mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çeşitli PET yüzdelерini (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) içeren asfalt karışımların hacimsel ve mekanik özellikleri hesaplanmış ve laboratuvar testleri ile değerlendirilmiştir. Uygun PET miktarı ağırlıkça bitüme %6 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu yazıda polietilen modifiye asfalt karışımı üzerinde yapılan bazı çalışmalar da

dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, PET ilavesinin TMA'nın özellikleri üzerinde önemli bir olumlu etkiye sahip, PET, kalıcı deformasyona karşı direnç seviyesini artırarak karışımın sertlik seviyesini arttırmıştır. Atık PET'in Marshall Stabilesi, hava boşluğu ve karışımın kütle özgül ağırlığı üzerindeki etkileri önemlidir. Atık malzemelerin yeniden kullanılması endüstride çevre dostu ve ekonomik olmasından teşvik edebileceğini göstermektedir.

Raghuram ve ark. (2013) TMA numuneleri hazırlamak için düşük maliyetli polimerlerin kullanımını incelemiştir. Sonuçta stabilizatör olarak polimerlerle karışan TMA'nın akma özellikleri, neme karşı direnç, hasar ve kalıcı deformasyon özellikleri açısından iyi performans gösterdiği görülmüştür. Böylece bu karışımların yoğun trafiğe maruz kalan ve yağışlı hava koşullarında yol kaplamaları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Taş Mastik asfalt (TMA), hizmet ömrü boyunca kalıcı deformasyon miktarını azaltarak kaplamaların bakım ve onarım maliyetlerini düşürebilen ve aynı zamanda uzun ömürlü bir sıcak karışım asfalt türüdür.

Mokhtari ve Moghadas Nejad (2013) bir araştırmada daha verimli asfalt karışımlar üretmek için Tipik TMA karışımları oluştururken iki farklı katkı maddesi [selüloz elyaf ve stiren-bütadien-stiren (SBS)] ve bir tür Warm Mastik Asfalt (WMA) katkı maddesi olan FT Fischer-Tropsch (wax) kullanmıştır. FT Fischer-Tropsch (wax)'ın TMA karışımların performans özellikleri üzerinde çok anlamlı olmadığını, bağlayıcı malzemenin süzülmesini engellemesine rağmen, ikinci bir katkı malzemesi kullanımını, gerektirdiğini; ancak TMA ve WMA karışımlarda Stiren-bütadien-stiren (SBS), FT ve selülozik elyaf kullanımının kaplamanın hizmet ömrünü, sırasıyla 1,243; 1,154 ve 1,08 kat arttığını belirtmişlerdir.

2011 yılında Blazejowski yayınlanan “Stone Matrix Asphalt; Theory and Practice” (Taş Mastik Asfalt teori ve pratik) kitabında, TMA kaplamalar hakkında gen bilgi vermiştir. TMA'nın tasarımı ile ilgili olarak iskelet yapısını, kaba agreganın önemini, Mastik kısmını oluşturan ince agreganın pasif durumunu, fillerin-bağlayıcının ve bitümün drenajını engelleyen katkı fiberlerin TMA'daki etkisini çeşitli kaynaklara atıfta yaparak kitabında sunmuştur. Dünyada uygulanan metotları (Alman, Amerika, Hollanda, İrlanda vb.) karşılaştırmalar yapmıştır. Tasarım, ulaşım, serme ve sıkıştırma gibi süreçlerde Karşılaşılan problemleri incelemiştir. Taş mastik asfaltın (TMA'nın) tekerlek izine, çatlamaya, yorulmaya ve kaymaya karşı direnci üzerinde durmuştur. ayrıca TMA'nın İşlenebilirliği, sıkışa bilirliliği, suya ve donmaya karşı dayanımı, ılık

yansıtma özelliği, sessizliğini, geçirgenliği, bitüm tüketimi ve TMA'nın maliyetini ele almıştır.

Arslan (2014), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında İstanbul ili ve çevresinde bulunan taş ocaklardan kumtaşı (Kocaeli -Gölcük) ve dolomitli kireçtaşının (İstanbul – Cebeci bölgesi) Taş Mastik Asfalt uygulamalarındaki etkisini araştırarak bu gibi kayalardan oluşturulan TMA karışımlarının, bazalt (Çorlu - Karatepe) kullanılarak oluşturulan karışımlara alternatif olabilme olasılığını incelemiştir. Bu çalışmada KGM'nin sorumlu olduğu üç farklı proje ile imal edilmiş 50/70 penetrasyonlu bitüm %4,5 SBS ile modifiye edilmiş olan üç farklı TMA karışımların, performans ve fiziksel açıdan karşılaştırma esasına dayalı olarak incelemeler yapmıştır. Çalışmada, alternatif kayaç olarak dolomitli kireç taşının TMA karışımlarda kullanılması herhangi olumsuzluğu karşılanmamış bundan dolayı alternatif olarak kullanılabileceği karar verilmiştir.

Şanlıer (2018), çalışmasında (Kuzey Marmara Otoyolu Projesi) kapsamında Taş Mastik Asfalt karışımların maliyet analizi ile beraber performanslarını karşılaştırdığı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada 50/70 bitüm %4,5 oranında SBS ile modifiye edilmiştir. TMA kaplamaların ilk maliyeti geleneksel asfalta oranla fazla olsa bile, uzun ömürlü ve az bakım onarım gerektirmesinden dolayı geleneksel asfalt kaplamalardan daha ekonomik olduğu belirtmiştir. Performans yönünden bakıldığında özellikle tekerlek izi oluşumuna karşı direncini vurgulayarak bu tür bozulmaların yaygın olduğu alanlarda kullanılması önerisinde bulunmuştur.

A.Gürkan ve arkadaşları (2017) yaptığı bir çalışmada, TMA karışımına %3 oranında diatomit, filler olarak eklemiş ve fiber ilavesi yapılmadan TMA karışımının özellikleri belirlenmiştir. Normal TMA ile diatomit katkılı TMA karışımların performansları karşılaştırmıştır. İki tip TMA karışımları üzerinde; plastik deformasyonlara karşı davranışı belirleyen tekerlek izinde oturma tayini (TİO), yorulma ömrünün tespiti için dört nokta eğilmeli giriş eğme yöntemi ile yorulma (Fatigue) deneyleri ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dayanımı belirleyen İndirek Çekme Mukavemeti (İÇM) deneyleri tabi tutulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre her iki karışım, çekme dayanımı, sudan kaynaklanan hasarlara karşı davranış ve tekerlek izine karşı dayanım yönünden yaklaşık olarak benzer davranış göstermiştir. Fiberli TMA yorulmaya karşı daha iyi performansa sahiptir, özellikle 200x10⁻⁶ birim deformasyon seviyesinde, 2x10⁶ döngüye kadar başlangıç stiffness değerinin %70'ini korumuştur. Diatomitli TMA'nın yorulma

davranışı iyileştirmek için daha düşük oranda diatomitli karışımlar incelenmelidir. Sonuçta, mineral filler olarak diatomitin TMA’da kullanımı için yolda denenerek

1.2. Tezin amacı

Son yıllarda, artan trafik yükleri, daha büyük ve daha ağır araçlar ve artan lastik basınçları, karayolu sistemindeki hâlihazırda ağır yük ve çevre taleplerine ekleyerek, mevcut asfalt malzemesinin özelliklerini geliştirme ihtiyacını doğurmuştur. Kaliteli, stabilitesi yüksek, uzun hizmet ömrüne sahip, az bakım onarım gerektiren yol üstyapı tabaka yapımının seçilmesi ülke ekonomilerine katkı sağlayan ve doğal kaynakların korunması için bir yaklaşımdır. Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımın kullanılması tekerlek izine karşı direnci artırır, onarım maliyetini azaltır ve ayrıca diğer asfalt karışım türlerine kıyasla kaplama dayanıklılığını artırır.

Kaplamalarda kullanılan malzemelerin özelliklerini iyileştirerek veya bazı özel maddeler ilave ederek karışımların modifiye edilmesi yoluyla performanslarını arttırmak mümkün olmaktadır. Modifikasyon işlemi, katkıların belirli oranlarda ve şartlarda bağlayıcı içerisine veya karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılmasıyla yapılmaktadır. Kullanılmakta olan bitümlerin özelliklerini modifiye ederek gerek bağlayıcının gerekse karışımın performansı arttırılmaya çalışılmaktadır. Türkiye’de ve Dünya’da bitümlü sıcak karışımların mevcut yol ve hava koşullarına karşı daha dayanıklı olmaları üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Polimerler, asfalt modifikasyonunda daha iyi performans sağlayan en yaygın kullanılan katkı maddelerinden biri olarak kabul edilmiştir. Polimer modifiye asfaltın performansı, kullanılan polimerin tipine ve modifikasyon işlemini bağlıdır. Bu çalışmada, polipropilen atıkların pirolizi ile elde edilen ürünlerden katı ürün ile bitümlü bağlayıcının modifikasyonu yapılmıştır. Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının TMA’nın Marshall Stabilitesine etkisi incelenmiştir.

20. yüzyılın ilk çeyreğinden sonra, Plastik sektörü çok çeşitli dallarda, çok çeşitli amaçlarla kullanım alanı bulmuş olan ve kullanım alanı giderek genişlemeye devam eden bir ürün haline gelmiştir. Plastikler, ahşap, kâğıt, metal, cam, pamuk, yün, ipek ve kauçuk gibi pek çok doğal ürünün yerini almış, hemen hemen tüm sektörlerin yan sanayi konumuna gelirken tıp sektöründe de hızla artan kullanımı nedeniyle, insan hayatının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (URL 1). Ancak bununla beraber çevre kirliliğini de beraberinde getirmekte, bunlarla mücadele etmek çevre ve

kaynaklara korumak için bu malzemeleri sağlıklı bir şekilde toplamak ve geri dönüşüm yapmaktır. plastik atıkları çevrede kolayca çürümez ve çözünmez olduğundan dolayı yeniden kullanılması ön plana çıkmıştır. Plastiklerin geri dönüşümünün en önemli avantajı, doğal kaynakların korunması, çevrenin kirlenmesinin önlenmesidir.

Dünya plastik üretimi ve tüketiminde plastik türlerine baktığımızda; PE (polietilen) ilk ve PP (polipropilen) ikinci sırada yer almaktadır (URL 2, 2018).

Esnek kaplamaların Polimer modifikasyon ile imal edildiğine, oluklanmaya, düşük ısı çatlaklarına, yorulma çatlaklarına, soyulmaya ve sıcaklık etkilerine karşı son derece dayanıklı olduğu ve servis ömürlerinin normal esnek kaplamalara kıyasla daha uzun olduğu yapılan araştırmalarla kanıtlanmıştır. Bütün bu istenilen özelliklerinin yansira polimer modifiye ediciler esnek kaplama imalatının ilk maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadırlar. Polimer modifiyeli asfalt karışım, yolların kaplanması için nispeten maliyetli bir karışımdır. Bu tür karışımların maliyetini düşürmenin ve daha uygun hale getirmenin bir yolu, ucuz ve atık polimerlerin kullanılmasıdır. Bunun için, atık PP pirolizinden elde edilen katkı malzemesi, 50/70 penetrasyon bitümlü bağlayıcı ile karıştırılarak elde edilen modifiye bitümlü bağlayıcıların özellikleri; yumuşama noktası ve Penetrasyon deneyleri ile belirlenmiştir. Marshall yöntemine göre %5 PPP ve %4,5 SBS katkılı bağlayıcı oranlarında TMA numuneleri üretilmiş, üretilmiş numuneler deneyi tabı tutularak optimum bitümlü bağlayıcı oranları belirlenmiştir.

Bu amaçla;

%5, %5,5, %6, %6,5, %7, %7,5 (6 grup) bitümlü bağlayıcı oranı için:

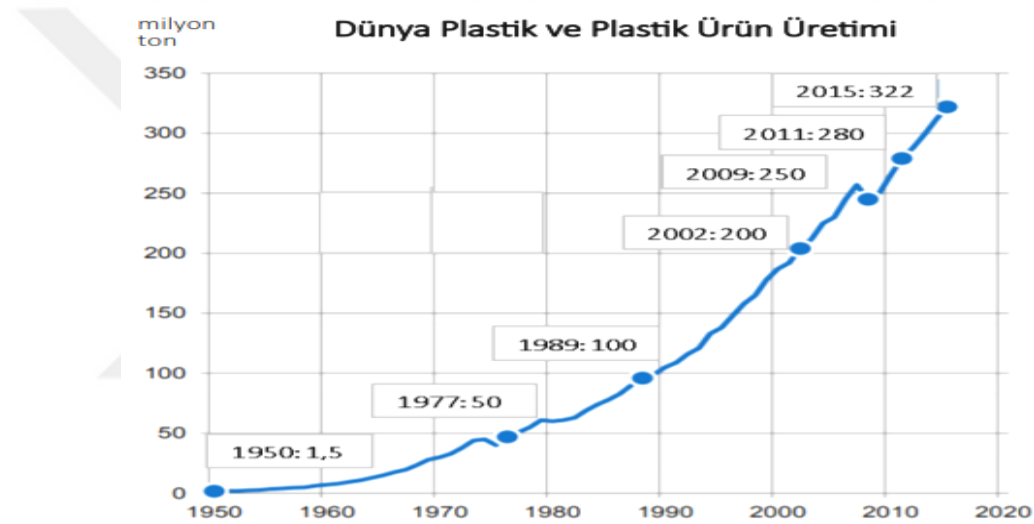
1. Orijinal bitüm (katkısız) bağlayıcı ile 3' er adet, toplam 18 adet,
2. %5 PPP ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile 3' er adet, toplam 18 adet,
3. %4,5 SBS ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile 3' er adet, toplam 18 adet,

Marshall briketler hazırlanmıştır.

1.3. Plastiklerin Türlerine ve Sektörlere Göre Dağılımı

Günlük hayatımızda kullandığımız birçok ürün plastik malzeme içermektedir. Plastik, doğrudan tüketim malzemesi olarak karşımıza çıkabileceği gibi, sahip oldukları yalıtım, darbelere karşı dayanıklılık, şekil verilebilirlik ve bükülebilirlik gibi özellikler sayesinde özellikle imalat sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Plastiklerin başlıca kullanım alanları ambalaj, yapı ve inşaat, ulaşım, elektrik ve elektronik ile sağlık sektörü olarak sıralanmaktadır. Türkiye'ye kıyasladığımızda, dünyanın 7. Avrupa'nın

ise 2. büyük plastik üreticilerindendir. Sektörde hammaddede ve üretim makinelerinde ithalata bağımlılık yüksektir. Dolayısıyla sektör net ithalatçı konumundadır. Diğer taraftan, plastik mamullerin kullanıldığı sektörlerin (otomotiv, beyaz eşya, tekstil vb.) ağırlıklı olarak ihracatçı sektörler olması sebebiyle, mamul bazında sektörün dış ticarete katkısı pozitiftir. Küresel ölçekte plastik ve plastik ürünlerin üretimi hızla artmaktadır. 1970'lerin ortalarından itibaren ivme kazanan artış paralelinde dünya plastik üretimi 2015 itibarıyla yaklaşık 322 milyon ton seviyesinde gerçekleşmiştir. Plastik arz ve talebinin, önümüzdeki dönemde çevresel kaygılara rağmen plastik kullanımının yaygınlaşmasıyla genel olarak yükselişini sürdüreceği öngörülmektedir. Bu çerçevede, küresel plastik üretiminin 2050 itibarıyla 1,2 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (URL 3, 2017).



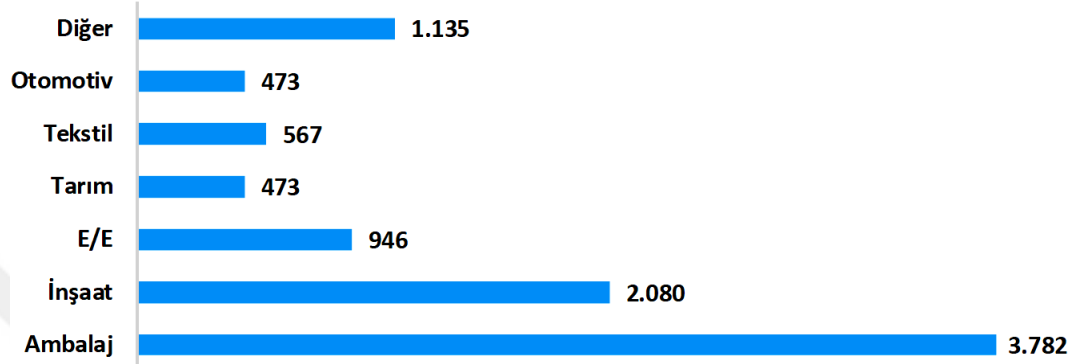
Şekil 1.1 Dünya plastik ürün üretimi (URL 3, 2017)

Dünya plastik üretimi ve tüketiminin plastik türleri itibarıyla dağılımını baktığımızda; PE (polietilen) ilk ve PP (polipropilen) ikinci sırada yer almaktadır. Çizelge 1,1'de plastik türlerine göre Avrupa ülkelerindeki üretim ve tüketim verilmiştir (URL 4, 2019)

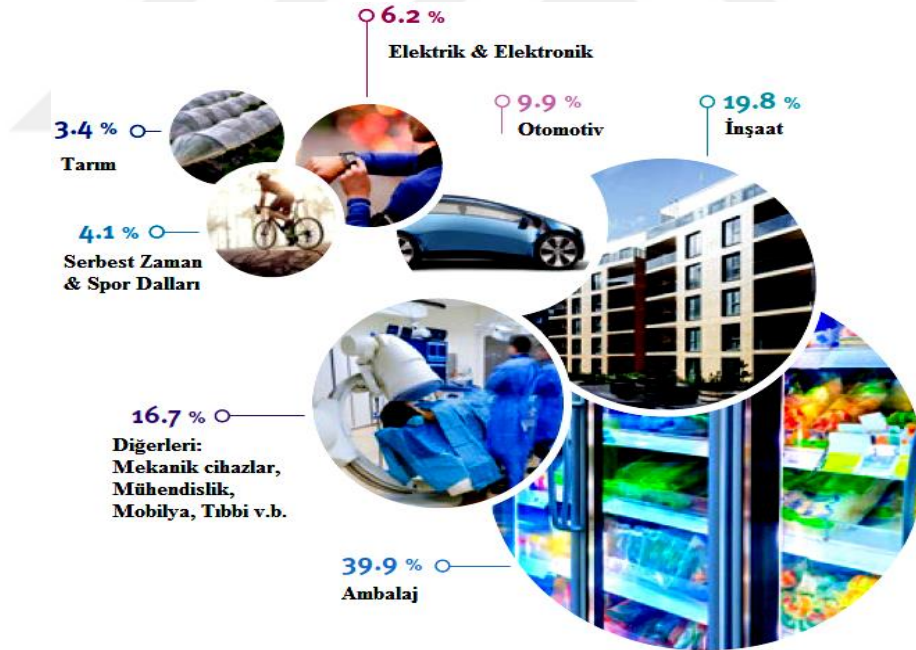
Çizelge 1,3 Plastiklerin türlerine göre kullanım oranı (URL 4)

Plastik Türü	Kullanım Oranı (%)
PP (Polipropilen)	19.3
DYPE (Düşük yoğunluklu polietilen)	17.5
YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen)	12.2
PVC (Polivinil klorür)	10.0
PUR (Poliüretan)	7.9
PET (Polietilen tereftalat)	7.7
PS (Polisitren)	6.4
Diğerleri (PC, ABS, PTFE, PBT vb.)	19.0

Türkiye’de 2019 yılında, 9,46 milyon tonluk toplam plastik mamul üretimi; %40 ambalaj, %22 inşaat, %10 elektrik–elektronik, %6 tekstil, %5’er otomotiv ve tarım sektörlerince gerçekleştirilmiştir. Diğer sektörlerin payı %12’dir. Alt sektörler itibariyle 2019 yılı Türkiye plastik üretimi şekil 1.2’de gösterilmiştir. 2018 yılına göre Avrupa’daki plastik talebinin sektörlere göre dağılımı da, şekil 1.3’de gösterilmiştir (Akmaz, 2020).



Şekil 1.2. Türkiye’de sektörler itibariyle 2019 yılı plastik mamul üretimi (milyon ton) (AKMAZ, 2020)



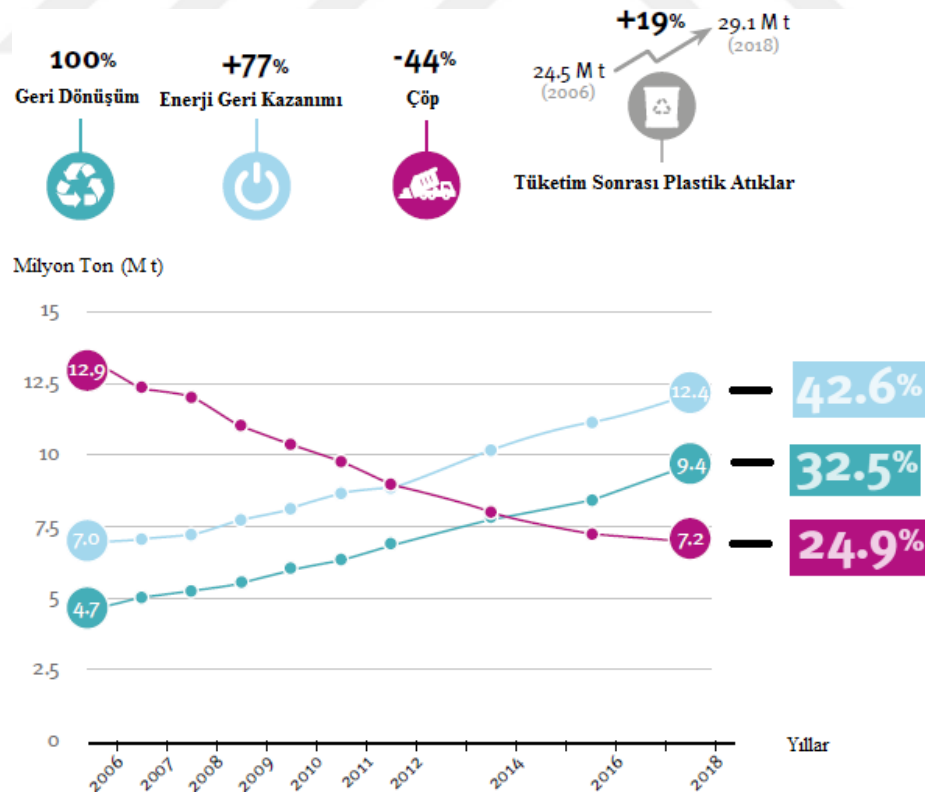
Şekil 1.3. 2018 yılı Avrupa plastik talebinin sektörlere göre dağılımı (URL 4)

1.4. Plastiklerde Geri Dönüşüm ve Kazanım

Dünyada plastik tüketimini baktığımızda ilk başta ambalaj sanayi %36 ile birinci sırada yer almakta, sonra sırayla %20 ile inşaat, %8 ile otomotiv ve %7 ile elektrik ve

elektronik sektörleri gelmektedir. Diğer tüm sektörler toplam tüketimden %29 pay almaktadır. Plastik talep artış büyük ölçüde Asya ve Doğu Avrupa ülkelerinde görülmektedir. Amerika ve Avrupa gibi geleneksel ülkelerin ileriki yıllarda pazar kaybına uğraması beklenmektedir. Avrupa plastik pazarını baktığımızda %86'sı sadece 7 ülke tarafından bölüşülmektedir. Pazar olarak %25 ile Almanya birinci, ikinci İtalya ve üçüncü sırayı Fransa almaktadır. Plastik sektöründe Avrupa Birliği (AB) Dünyada 60 milyon kişiye istihdam sağlarken, AB'de yılda ortalama 160 milyon Euro katma değer oluşturmaktadır. Dünya'da ise bu değer yıl ortalama 700 milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir (URL 5).

Plastik malzemeler, 150 yıl boyunca yenilikler için kilit noktası olmuş ve toplumun gelişmesine ve ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Dünya petrol üretiminin sadece %4 ila 6'sı plastik üretiminde kullanılmaktadır. Plastik malzemeler, menşei ne olursa olsun, hizmet ömürlerinin sonunda, yeni malzemeler şeklinde veya enerji geri kazanım tesislerinde kullanıldıktan sonra alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğimiz önemli kaynaklardır. Dolayısıyla, plastiklerin yaygın kullanımı ve kısıtlı kaynaklar sebebiyle plastik atıkların geri dönüşümü önemli bir boyut kazanmaktadır (URL 6).



Şekil 1.4 2006–2018 yılları arasında Avrupa'daki plastik atık süreçlerinin durumu (AKMAZ, 2020)

2006'dan beri AB ülkelerinde geri dönüşüme gönderilen plastik atık miktarı iki katına (%100) çıkmış, enerji geri kazanımı %77, Toplanan tüketim sonrası plastik atıklar %19 artmış ve çöp sahaları %44 azaltmıştır. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi; 2006 yılında 24,5 milyon ton olan toplam atık plastiğin 12,9 milyon tonu çöp olarak kalırken, 2018 yılında bu değerler sırasıyla 29,1 milyon ton ve 7,2 milyon ton çöp olmuştur. Geri dönüşüm veya enerji kazanımı ile plastik kazanım döngüsü yıllara göre arttığı ve plastik çöp miktarı azaldığı halde, 2018'de tüketici sonrası plastik atıkların yaklaşık %25'i hala düzenli depolama alanına gönderilememiş ve çöp olarak doğada kalmıştır. 2018 yılında, Avrupa'da tüketim sonrası 29,1 milyon ton civarında plastik atık değerinin %32,5'lik kısmı geri dönüşüm ve %42,6'lık kısmı da enerji geri kazanımı yoluyla olmak üzere, %75,1'lik kısmı kurtarılabilmektedir (URL 4, 2019).

Plastik ürünlerin yaşam döngüsünü anlamak için, tüm plastik ürünlerin aynı olmadığını ve hepsinin aynı hizmet ömrüne sahip olmadığını anlamak önemlidir. Bazıları kendi içinde bir üründür (bir şişe gibi) ve bazıları bir son kullanıcı ürününün parçalarıdır (yani bir arabanın parçaları veya elektronik cihazlar, bir bina için yalıtım vb.). Kullanım ömrü sonunda son kullanıcı ürünleri toplanan ve işlenen atık haline gelir. Bazı plastik ürünlerin bir yıldan az, bazılarının 15 yıldan fazla ve bazılarının 50 yıl veya daha fazla kullanım ömrü vardır. Bu nedenle, üretimden atığa kadar farklı plastik ürünler, bireysel değer zincirleri içinde farklı kullanımlar gösterirler (URL 4, 2019).

Geri dönüşüm, plastik atıklar için tercih edilen en sürdürülebilir seçenektir fakat geri dönüşüm artık sürdürülebilir bir seçenek olmadığında, enerji geri kazanımı da bir alternatiftir. Her iki seçenek de birbirini tamamlamakta ve plastik atıkların tam olarak kullanım potansiyelini gerçekleştirmeye yardımcı olmaktadır (URL 7).

Türkiye'deki duruma bakıldığında; 2017 yılının sonlarında yayımlanan "ambalaj atıklarının kontrolü yönetmeliğinde" ambalaj atıklarının geri kazanımı ile ilgili olarak, Madde 19'da geri kazanım hedefi belirlenmiştir. Madde 19'da, Yetkilendirilmiş kuruluş/piyasaya sürenler, 2005 yılından 2018 yılına kadar ambalaj atıklarının en az aşağıda belirtildiği oranlarda geri kazanım hedeflerini sağlamakla yükümlüdürler." ibaresi vardır. Bu geri kazanım hedefleri çizelge 1.4'de verilmiştir (URL 7).

Çizelge 1.4 Ambalaj atıklarının geri kazanımıyla ilgili yönetmelik kriterleri (URL 7)

Yıllar	Yıllık geri kazanım hedefleri malzemeye göre (%)				
	Plastik	Cam	Metal	Kâğıt/Karton	Ahşap
2005	32	32	30	20	0
2006	35	33	33	30	0
2007	35	35	35	35	0
2008	35	35	35	35	0

2009	36	36	36	36	0
2010	37	37	37	37	0
2011	38	38	38	38	0
2012	40	40	40	40	0
2013	42	42	42	42	5
2014	44	44	44	44	5
2015	48	48	48	48	5
2016	52	52	52	52	7
2017	54	54	54	54	9
2018	54	54	54	54	11
2019	54	54	54	54	13
2020 ve sonrası	55	60	55	60	15

Plastikler, kendilerine özgü özelliklerinden faydalı bir şekilde yararlanılabilecek alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin: PVC, yapı ve inşaatteki tüm uygulama alanlarında en fazla kullanılan plastik; PP de otomotiv sektörü içerisinde ve Yemek paketlemesinde en yaygın kullanılan plastiktir (URL 4, 2019).

1.5. Polipropilen (PP)

Polipropilen, otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan mutfak gereçleri üretimi ve yiyecek paketlemesine kadar birçok alanda kullanılabilen, termoplastik bir plastik malzemedir. Polipropilen, monomer propilenin polimer hale getirilmesiyle elde edilen asit ve bazlara karşı dayanıklıdır. Polipropilen, yorulmaya karşı çok iyi direnç göstermektedir. Maliyet anlamında düşük seviyesi ile ticari kullanım alanı oldukça geniştir. Darbeye karşı oldukça iyi direnç gösterir. Sürtünme katsayısı düşük olup, çok iyi elektrik yalıtımı sağlamaktadır. Kimyasal direnci iyidir. Tüm termoplastik işleme proseslerine uygundur. Erime sıcaklığı 130 ile 171°C arasındadır. Polipropilen üç sınıfa ayrılabilir: (a) Homopolimer polipropilen (HPP) sınıfları yüksek sertlik gösterirler, (b) Kopolimer Polipropilen (CPP) sınıfları düşük sıcaklıkta bile daha iyi darbe performansı sağlarlar ve (c) Random Kopolimer Polipropilen (RACO PP) sınıfları veya istatistikî kopolimerler saydamdırlar (URL 8).

Homopolimer PP, sert malzemedir oluşmakta ve darbeye karşı nispeten dayanıklıdır. Bu hammaddeden üretilen ürünler berraktır. Termoform (ısı ile şekillendirme), şişirme (üfleme) ve enjeksiyon kalıplama süreçlerinde işlenebilmektedir (Arıkan, 2007).

Blok kopolimer PP, yüksek sertlik gösterirler homopolimer PP'den daha dayanıklıdır. Genellikle içeriğinde etilen bulunur. Etilen içeriği ne kadar fazla olursa o kadar dayanıklı olur. Bu özelliğinden dolayı blok kopolimer PP, dondurma gibi

dondurulmuş gıdaların ambalajlanması için en çok tercih edilen ürünlerden biri olmuştur. Dondurma, katı yağ vb. gıdaların ambalajı, boya gibi kimyevi maddeler için küçük veya geniş hacimli kaplar, içecek, sebze ve meyve, unlu mamul kasalarının bir kısmı (YYPE olanlar var), ev eşyası veya çok çeşitli amaçlarla kullanılan kova, kap, kutu vb. birçok uygulaması ile blok kopolimer PP'nin çok geniş bir uygulama alanı vardır (Arıkan, 2007). Şekil 1.5'de iki farklı PP tipine ait örnekler gösterilmiştir.



Şekil 1.5a Homopolimer PP



Şekil 1.5b Blok Kopolimer PP

Random kopolimer PP, homopolimer PP'den daha fazla direncine sahip, fakat düşük ısılarda kırılındır. Daha çok termoform süreciyle üretilen kaplarda kullanılırlar. Son yıllarda şişe amaçlı uygulamalarında da büyük artış olmuştur. Ketçap şişeleri imalatında, bu hammadde daha sık kullanılmaktadır (Arıkan, 2007).

2. KARAYOLU YAPISI VE ÜSTYAPIYA BİR BAKIŞ

Tekerleğin icat edilmesinden bu yana yolların inşası temelde bir mühendislik sorunu olmuştur. Hızlı nüfus artışı ile birlikte insanların ulaştırma ağıyla olan bağlantısı giderek artmakta ve bununla birlikte ulaşım sistemlerinin güncellenmesini ve daha sağlam yol elemanlar yapılması gerektirmektedir. Bundan dolayı ulaşım sistemlerinin ve ağlarının iyileştirmesi ve yeni ve en ekonomik ulaştırma sistemlerinin inşası gerekmektedir. Yol altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Altyapı toprak işleri (yarma ve dolgu) ve sanat yapılarından oluşur, başka bir deyişle tesviye yüzeyi ile doğal zemin sınırı arasındaki bölgeye altyapı denir. Üstyapı ise trafik yüklerini altyapının (taban zeminine) taşıma gücünü aşmayacak şekilde dağıtarak ileten tabakalı bir yapıdır. Üstyapı, trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere azaltmak, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacı ile altyapı üzerine yerleştirilen, alt temel, temel ve kaplamalardan oluşan tabakalı yol yapısıdır (Sağlık ve Güngör, 2008, Arslan, 2014).

Üstyapılar, kullanılan malzemelerin niteliklerine ve davranışını göre Esnek ve Rijit olmak üzere iki ana tipe ayrılır. Taban zeminine, trafiğe, çevre şartlarına ve ekonomik faktörlere göz önünde alınarak en uygun üstyapı tipi seçilir (Sağlık ve Güngör, 2008).

2.1. Rijit Üstyapı

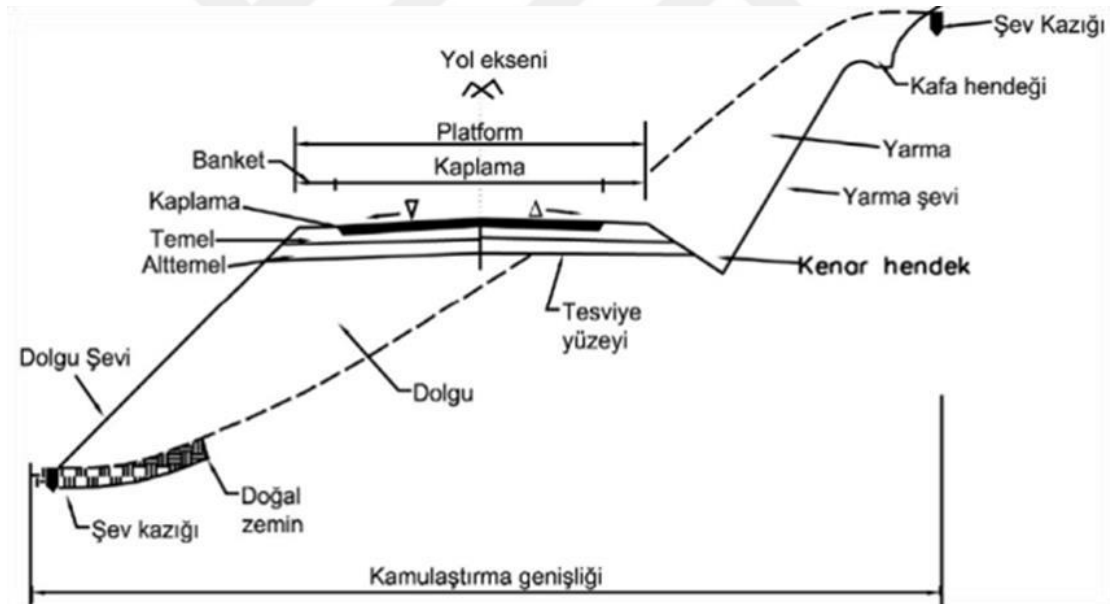
Trafik yüklerinin büyük bir kısmı Portland çimentosundan yapılmış plaklarla taşındığı, kalan kısmı alt yapıyı (taban zemini) aktardığı üst yapı tipine rijit üstyapı denir. Taban zeminin dayanım durumuna göre beton plakanın altında temel tabakası yapıp yapılmadığını karar verilir. Rijit üstyapı esneklik modülü değerleri ve taşıma kapasite değerlerinin yüksek olmasından dolayı trafik yüklerine geniş bir yüzeye yayarak güçlü bir direnç göstermektedir.

Rijit üstyapılarda hava koşullarından, trafik yüklerinden ileri gelen gerilmeler altında beton plakada çatlama ve genleşmeler ortaya çıkar bu bozulmalara önlemek, sınırdan tutmak veya çatlakların belirli yerlerde oluşmasını sağlamak amacıyla derzler yaparak kaplamayı serbest hareket eden plaklar halinde getirilmektedir. Rijit üstyapılar uzun hizmet ömrüne (30 – 40 yıllık) sahip oldukları için ilk yatırım maliyeti esnek

üstyapılara oranla yüksek olmasına karşın, beton yollar işletmesi boyunca fazla bakım ve tamirat gerektirmemektedir (Arslan, 2014, Kabadayı, 2019).

2.2. Esnek Üstyapı

Karışımlarında bağlayıcı olarak bitümün kullanıldığı kaplama tabakalarıyla teşkil edilen üstyapılara “esnek üstyapı” denir. Esnek üstyapılarda gerilmeler üst tabaktan aşağı doğru azalmaktadır. Esnek üstyapı, tesviye sathıyla ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alt temel tabakaları yolu ile tabii zemine dağıtan bir üstyapı şekli olup, stabilitesi; adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Üstyapı tabaka kalınlıkları veya tabaka sayısı, taban zemininin taşıma gücü, yapılacak yolun kullanım amacı, trafik yoğunluğu gibi nedenlere bağlıdır (Arslan, 2014, Şanlıer, 2018, KABADAYI, 2019)).



Şekil 2.1 Esnek üstyapı kesiti (Kabadayı, 2019)

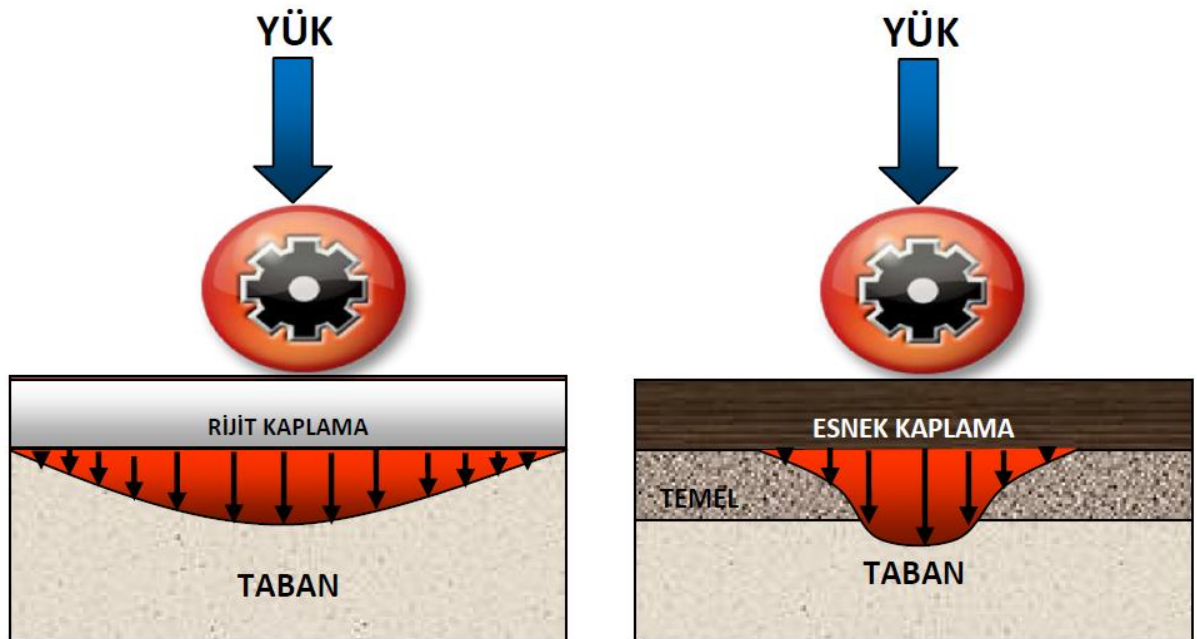
Genel olarak esnek kaplamalar iki sınıfa ayrılır.

- Bitümlü sıcak karışımlar (Karışım tipi kaplamalar)
- soğuk karışımlar (Sathi kaplamalar)

Esnek kaplamalarda en önemli malzemesi olan agrega, tek başına bir temel görevi gördüğü gibi çok basit asfalt uygulamaları (örneğin; penetrasyon makadam, sathi kaplama, vb.) ile düşük trafik hacmine sahip yollar için kaplama görevi de görmektedir.

Düşük trafik hacmine sahip yollar için kaplama görevi de görmektedir. Agregadan imal edilen stabilize kaplama, taşıma gücü açısından bir sorun yaratmaz iken, bağlayıcısı olmadığından dolayı taşıt tekerlekleri tarafından sökülmesi, derin tekerlek izi olukları oluşması, kuru havalarda çok ince danelerin toz yapması, çok ıslak iken yeterince stabil olmaması, vb. nedenlerden dolayı kaplama olarak görevini yerine getirememektedir. Zaten yol mühendisliğinin babası sayılan Macadam, stabilize kaplamadaki bu olumsuzlukları gidermek amacıyla, stabilize kaplama yüzeyine akışkan katran tatbik ederek kendi adıyla anılan makadam kaplamayı ortaya koymuştur. Tüm esnek kaplamaların stabilitesinden sorumlu olan agreganın, hem miktar hem de fonksiyonel olarak önemli bir görev üstlenmesinden dolayı iyi bilinmesi zorunludur (Tunç, 2004, Arslan, 2014).

Rijit ve esnek üstyapılar, trafik yükünü taban zeminine aktarma şekilleri (Şekil 2.2) gösterilmiştir.



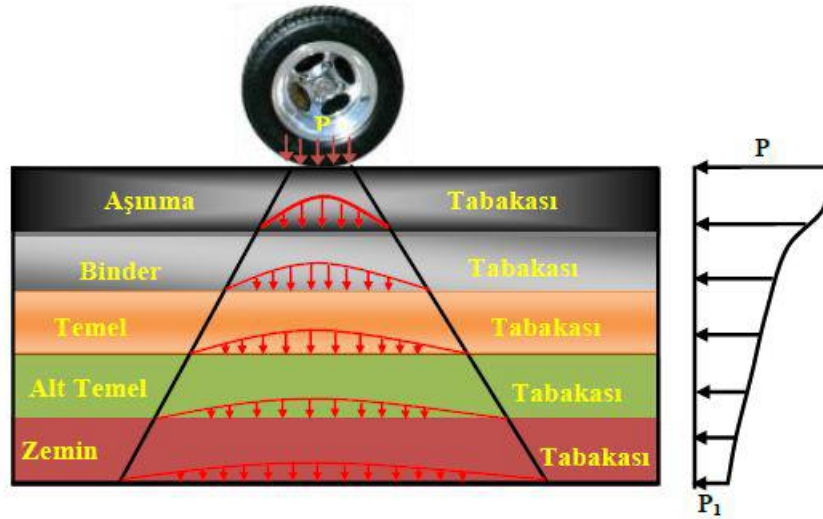
Şekil 2.2 rijit ve esnek üstyapılarda yük dağılımı (Arslan, 2014)

2.3. Karayolu Esnek Üstyapısının Projelendirilmesi

Yol üstyapısı, trafik yüklerinin ve doğal şartların etkisini maruz kalırlar. Esnek üstyapı dizaynı; kaplama tabakalarının yapısal tasarımı (tabaka kalınlıkları ve cinsi) ve karışım tasarımı olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Bir yol üstyapısı, farklı elemanlardan oluşmakta, proje ömrü boyunca bu elemanlar üstyapının emniyetli bir şekilde ve her türlü iklim koşulları altında hizmet verebilmesini ayrıca çok sayıda aracın

üzerinden geçmesini sağlayacak koşulları yerine getirebilmelidir. Esnek üstyapılar tabaklı olarak projelendirirler, üstyapı üzerinden gelen trafik yükler bu tabaklardan geçerek taban zeminine iletilmesi, zemin içindeki klasik yük dağılışı gibidir. Yani trafik yükleri (tekerlek yükleri) altında esnek üstyapı deforme olur ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz azaltılarak iletir. Bu şekilde, zemin katmanına ulaşan yükler büyük bir alana yayılmış oluyor. Şekil 2.3 te yük dağılım şekli gösterilmiştir.

Üstyapıların projelendirilmesinde amaç, hizmet ömrü boyunca, üzerinden geçen trafiğin, büyük deformasyonlara, çatlamalara maruz kalmadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapının toplam kalınlığının ve tabakaların tek tek kalınlıklarının belirtilmesi, kullanılacak malzemelerin özelliklerinin saptanmasıdır. Bu konu üstyapı kalınlık hesabının ilk aşamasını oluşturur. İkinci aşama dizayn edilen üstyapının ekonomikliğinin araştırılmasıdır. Çünkü günümüzde karayolu üstyapılar en pahalı mühendislik yapılarından biridir. Bu nedenle tabaka kalınlıkların hassas bir şekilde yapılmalı gereksiz fazla kalınlıktan kaçınılmalıdır (Akın ve ark, Arslan, 2014).



Şekil 2.3 üstyapı kesiti ve gerilme dağılımı (Arslan, 2014)

Üstyapıların modellenmesinde projelendirme yöntem olarak AASHTO 1960 ve daha sonra AASHTO 1972 belirli tipteki malzemelerin statik (durağan) yükler altında davranışları esas alarak Türkiye’de geleneksel olarak kullanılmıştır. Oysaki günümüzde teknolojik gelişmelerine bağlı çeşitlilik arz eden malzemeleri ve güncel trafik şartlarını baktığımızda statik yükten ziyade sürekli olarak dinamik yükleri maruz kalır ve bu metotlar (AASHTO 1972) temsil edemez duruma geldiğinden; Türkiye projelendirme şartnamelerini daha ileriye taşıyabilmek için hem AASHTO 1993, hem de yeni Mekanistik-Ampirik projelendirme metodunun gerekli kıldığı ve malzemelerin dinamik

yükler altındaki davranışını temsil eden esneklik modülünün belirlenmesi bir gereklilik olarak ortaya çıkmıştır (Güngör ve Sağlık, 2009).

Bu nedenle Türkiye karayolları genel müdürlüğü (KGM) üstyapılarında kullanılan malzemelerin esneklik modüllerinin (Resilient modulus) belirlenmesi ve şartnamelere kazandırılması için TÜBİTAK destekli bir proje yürütülmüştür. Bu çalışma sonunda, Karayolu Esnek üstyapılar Projelendirme Rehberi esneklik modülünün esas alındığı AASHTO 1993'e göre düzenlenerek 2008 yılında uygulamaya geçmiştir. Esneklik modülüne dayanan rehberle beraber üstyapı tabaka kalınlıkları yenilenerek, tüm Türkiye karayolu uygulamalarında kullanımı sağlanmış, üstyapıların daha gerçekçi modellenmesi ile büyük bir ekonomi de sağlanmıştır (Arslan, 2014).

Bu kapsamda, Türkiye'nin hemen hemen dört yanından temin edilen pek çok çeşit üstyapı malzemesi üzerinde esneklik modülü ile birlikte likit limit, plastik limit, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve kompaksiyon deneyleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilip, esneklik modülü ile malzemenin diğer özellikleri arasındaki bağıntı kurularak, esneklik modülünün kolayca tespit edilebilmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda farklı tipteki Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) tabakalarında esneklik modülü deneysel olarak tespit edilmiş ve buna yönelik bağıntılar ortaya konularak üstyapı Karayolu Esnek üstyapılar Projelendirme Rehberine göre, tasarım yönteminde sırasıyla şu işlemler ele alınır:

- Üstyapı proje süresi (performans periyodu) belirlenir.
- Karayolu üzerinden geçen çeşitli dingil yükleri (trafik yükleri) proje süresi boyunca, 8,2 ton eşdeğer standart dingil yüke çevrilerek bulunur.
- yolun trafiğe ilk açıldığı andaki hizmet kabiliyeti ile proje süresi sonunda beklenen hizmet kabiliyeti önceden belirlenir. Yolun yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet etme kabiliyeti olan hizmet kabiliyeti 0 ile 5 arasında değişen değerle tanımlanıyor 0 en düşük hizmet 5 ise en fazla hizmet kabiliyetidir.
- Güvenilirlik; projelendirilmesi yapılan üstyapıya ait proje ölçütlerinin, belirlenen proje süresi boyunca, hâkim trafik ve çevre koşulları altında, yoldan beklenen projelendirme şartlarını karşılama olasılığı olup yüzde olarak belirlenir.
- Yol gövdesinin ömrü boyunca stabil kalabilmesi için, sudan korunması gerekir ve Alt temel, temel tabakalarına ait drenaj katsayıları ve izafi mukavemet sayıları malzeme cinsine göre belirlenir.

- Üstyapı sayısı belirlenir.
- Üstyapısı hesaplanacak yolun oturacağı doğal zeminin taşıma gücü (California Bearing Ratio) hesaplanarak belirlenir.
- Esneklik modülü (Resilient modulus, M_R) belirlenir.
- Üstyapı çevre etkilerini özellikle dona karşı karşıya kalan tabakalar olduğundan dolayı dona karşı korunmasının gerekliliği araştırılır.
- Üstyapı sayısını (SN) gerçek kalınlığa dönüştürmek için, bulunan tabaka kalınlıkları, daha önce hesaplanmış olması gereken tabaka kalınlıklarını içeren tablolardan kontrol edilir eğer yetersiz ise tabaka kalınlıkları artırılır.

Kum-çakıl alt temel tabakasının minimum kalınlığı 20 cm kırma taş alt temel tabakasının minimum kalınlığı ise 15 cm olmalıdır. Minimum granüller ve plent-miks temel kalınlığı 15 cm, çimento bağlayıcılı granüler temel kalınlığı 20 cm ve sıcak karışım bitümlü temel kalınlığı ise 8 cm olmalıdır (Güngör ve Sağlık, 2009).

2.4. Kaplama Tipi Seçimi

Karayollarında üstyapı tipinin seçilmesi önem verilmesi gereken bir konudur. Üstyapı tipi seçiminde teknik ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınarak, karara verilmelidir (Arslan, 2014).

Esnek üstyapı tabakaları, yüksek ve düşük standartlı kaplamalar iki sınıfı ayrılırlar, yüksek standartlı esnek üstyapılar (BSK tabakaları) ve düşük standartlı esnek üstyapılar (sathi kaplamalar, makadam temeller, koruyucu satıh tabakaları).

Sathi kaplama: yolun kabul edilen hizmet süresi boyunca geçecek, tek yönde toplam standart dingil (8,2 ton) sayısı 2×10^6 dan az olan yollarda uygulanmalıdır.

Sıcak karışım kaplam: Toplam standart dingil sayısı, 2×10^6 - 3×10^6 arasında olan yollarda ise sıcak karışım kaplama uygulanmakta ise de, ekonomik durumlar göz önüne alınarak ve proje ömrü kısa tutularak çift kat sathi kaplama yapılabilir. Proje süresi içinde geçecek toplam standart dingil sayısı 3×10^6 dan fazla olan yollarda kaplama olarak asfalt betonu kullanılmalıdır (Sağlık ve Güngör, 2008).

2005 yılında, Ulaştırma Bakanlığı ile İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Rektörlüğü arasında imzalanan yayın raporunu göre, ağır taşıt (toplam yük ağırlığı 10 tondan fazla olan taşıtlar) trafiği yüksek olan sathi kaplamalı yolların kaplamasının çok sık yenilendiğini ortaya koymuştur. Bundan dolayı sathi kaplamalı yollar BSK

kaplamalı yollara kıyasla bakım maliyeti 4-5 kat daha fazla olmaktadır. Bu aşırı bakım maliyetlerini önlemek için söz konusu raporda, proje süresi boyunca Yığılımlı Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Sayısı (YESDYS) 3×10^6 nın üzerinde olan yolların, ağır taşıt trafiğine uygun olan asfalt betonu (BSK) ile kaplanması gerekliliği vurgulanmıştır (İTÜ ve UBAK, 2005).

Karayolların en üst tabakası olarak inşa edilen bitümlü sıcak karışım (BSK) aşınma tabakası, genellikle asfalt betonu karışımı ile önemli ve ağır trafikli yollarda Taş Mastık Asfalt (TMA) karışımı kullanılmaktadır. Aşınma tabakaları Yolun yapılacağı bölgenin trafik ve iklim koşullarına göre karışımın cinsi ve bitüm tipi seçilir gerektiğinde modifiye bitümler de kullanımı tercih edilir.

Genelde trafik ve yolun yapılacağı bölgenin iklim koşullarına bağlı olarak karışım ve bitümlü bağlayıcı tipinin seçilmesi gerekir. Sıcaklık farklılıklarının yüksek olduğu, sıcak bölgeler ve ağır araç trafiğinin yoğun olduğu bölgeler için polimer modifiye asfalt (PMB) TMA kullanılmaktadır. Yaz sıcaklıklarının çok yüksek ve kış sıcaklıklarının çok düşük olmayan bölgeler için en uygun karışım saf bitüm ile hazırlanmış TMA karışımlardır. Yaz kış sıcaklıkları yüksek ve hafif trafiğe sahip olan sıcaklık farkları fazla olan bölgelerde PMB'li asfalt betonu, yaz ve kış sıcaklığı çok yüksek olmayan ve hafif trafikli yollarımızda ise normal bitümlü asfalt betonu tabakası kullanımı tercih edilir (Güngör ve ark. 2012).

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), agrega ve asfaltın plentte homojen bir şekilde yüksek sıcaklıkta karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Agregaları kurutmak ve uygun karıştırma ve işlenebilirlik için yeterli asfalt çimentosu akışkanlığı elde etmek için, hem agrega hem de asfalt karıştırmadan önce ısıtılır, agrega ve bitümün sıcak bir şekilde tesiste karıştırılması, tesisten alınan sıcak karışımın uygulanacak bölgede belli sıcaklıkta serilip sıkıştırılması şeklinde verilebilir. Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) üç ana bileşenden, agrega, bitüm ve hava olmak üzere oluşmaktadır. Asfalt çimentosu (bitüm) termoplastik ve viskoelastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde deformasyon, geri dönüşümlü (elastik özelliğinden dolayı) ve zamana bağımlıdır (viskoz özelliğinden dolayı). Yükleme hızının yüksek olduğu durumlarda viskoelastik malzemeler rijit bir davranış yani elastik bir davranış ve yüksek mukavemet göstermektedir. Termoplastik malzemelerde ise gerilme şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla bağlı olarak

değişmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise rijitliğin ve mukavemetin arttığı, Yüksek sıcaklıklarda rijitliğin ve mukavemetin azaldığı görülmektedir. Bitüm 'ün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansiyarak karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki yapmaktadır.

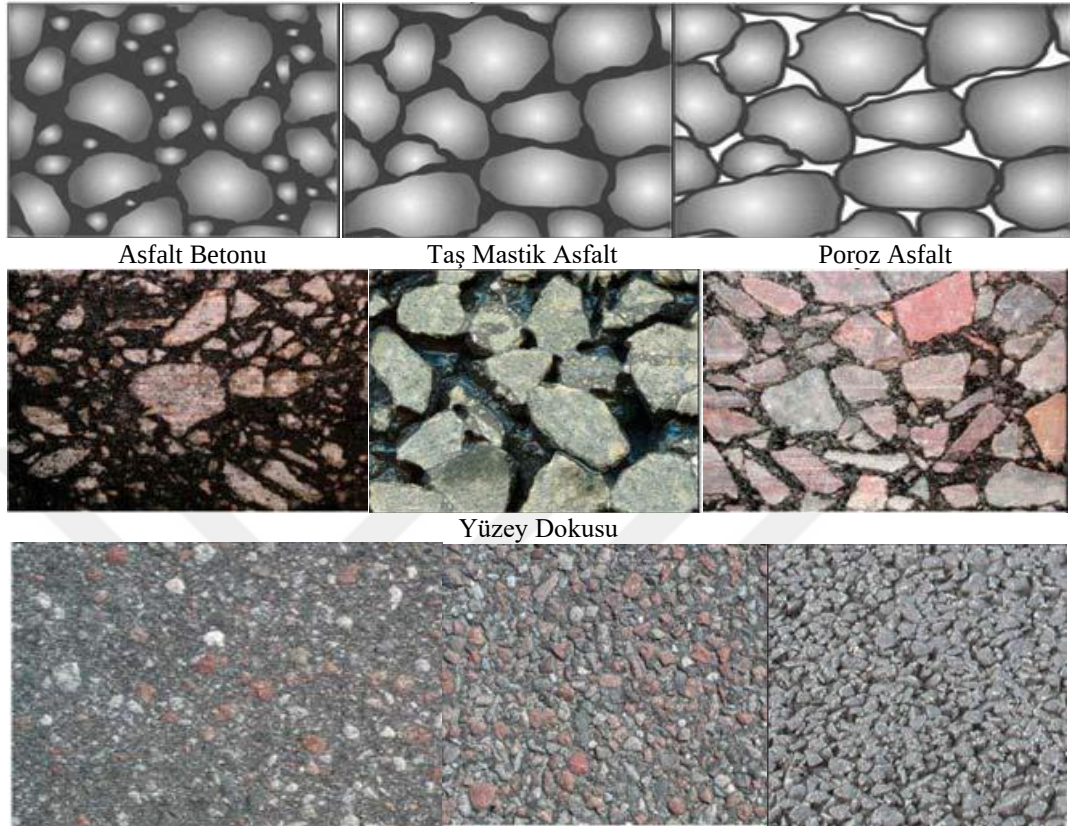
Bitümlü sıcak karışımların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar, tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışdır (Kök ve arak, 2007)

2.5.1. Bitümlü Sıcak Karışım Tipleri

BSK kaplamalar karışımındaki agreganın gradasyonuna ve kullanım amacına göre yaygın olarak dört farklı şekilde sınıflandırılır. Bu karışımların dane dağılımı, boşluk miktarı, asfalt muhtevası ve yüzey dokuları farklılık arz eder.

- **Açık granülometrilik karışımlar;** bu tip karışımlarda ince agrega oranı çok az, boşluk oranı fazladır. Poroz (geçirimli) asfalt bu tür karışımlara örnek olarak verilebilir.
- **Kesikli granülometrilik karışımlar;** Bu tip karışımlar pürüzlü bir yüzey oluştururlar. malzeme, belirli elek aralarında fazla, belli elek aralıklarında yok veya çok azdır. örnek olarak TMA karışımlar verilebilir.
- **Yoğun granülometrilik karışımlar;** bu tip karışımlar yüzey pürüzlülüğü azdır. agrega gradasyonu düşük boşluk verecek şekilde süreklilik tasarlanır. Bunlara asfalt betonu tabaka karışımları (bitümlü temel, binder, aşınma), bitümlü makadam ve bitümlü temel örnek verilebilir. Asfalt betonu genel anlamı ile aşınma ve binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Asfalt betonunda, agrega gradasyonunun sürekliliği nedeniyle, karışımındaki mineral agregalar arasındaki boşluk değerleri az olmakta, dolayısı ile bu karışımların, ince asfalt filmi tabakası yüzünden durabiliteleri düşük olmaktadır.
- **Harç tipi karışımlar;** harç tipi karışımlarda ince malzeme oranı fazla ve kaba malzeme ince malzeme-bitüm karışımı içinde dağılmış haldedir. Bu karışımlarda boşluk oranı az, pürüzlülük azdır. Beton ve çelik köprüler döşeme üzerinde kullanılabilen bu tür kaplamalara mastik asfalt örnek olarak verilebilir. İlk Mastik asfaltın kullanımı yollarda Almanya'da Gusasfalt olarak başlamıştır. Özellikle köprüler olmak üzere beton veya çelik uygulanan esnek, boşluksuz

asfalt tabakasıdır. Dolayısıyla, su geçirmezdir. Karışım 200-250°C arasındaki sıcaklıkta uygulanmaktadır.



Şekil 2.4 BSK karışımların yapısal ve yüzeysel farkları.

2.5.2. Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri ve Performansını Etkileyen Faktörler

Bitümlü Sıcak karışımlar ile yapılan aşınma, binder ve bitümlü temel gibi esnek kaplama tabakalarının kaliteleri farklı özelliklere bağlıdır. Taş mastik asfalt (TMA) sıcak karışımın bir çeşidi olduğundan dolayı, kaplamaların stabilite, rijitlik, durabilite, yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik, işlenebilirlik ve kayma direnci özelliklerinin bilinmesi ve belirli koşulları sağlaması gerekir. Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışımları elde etmek bugün için hemen hemen mümkün değildir. Ancak karışımları deneyi tabi tutmak ve optimum miks dizayn (karışım hesaplarının) yapılabilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi ve araştırması gerekir (Tunç, 2004).

Stabilite; yol kaplamaların trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı koyma yeteneği olarak tarif edilebilmektedir. Sıcak asfalt karışımının stabilitesi trafik

yüklerini karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Düşük stabilite fazla deformasyonları sebep olur. Stabiliteye etki eden faktörlerden biri; kullanılan bitümün sertliği, bir başka ifade ile penetrasyonudur. Düşük penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanıldığı zaman, kaplamanın stabilite değerinin daha yüksek olacağı düşünülebilir. Ancak çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise aşırı yüksek stabilite de o kadar zararlıdır. Aşırı yüksek stabilitede, çok sert bir karışım (gevrek karışım veya rijit karışım) yüklemelere (gerilmelere) maruz kaldıklarında esnek davranış göstermeyip kaplamalarda çatlaklar meydana gelir. Bu yüzden karışımların optimum stabilitede olması gerekmektedirler (Tunç, 2004, Arslan, 2014).

BSK stabilitesine etki eden diğer faktörler “kayma mukavemeti”, “sıcaklık” ve “eylemsizlik direnci” dir. Kayma mukavemeti aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

Burada;

τ Bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemeti,

σ kaymaya neden olan gerilme,

ϕ agrega daneleri arasındaki sürtünmeden ve kilitlenmeden kaynaklanan içsel sürtünme açısıdır.

C, ise kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki adezyon (yapışma) yani bağ kuvvetini ifade etmektedir.

Dolayısı ile içsel sürtünmeden agrega ve kohezyondan ise asfalt sorumlu olmaktadır. İçsel sürtünme direnci (veya agrega daneleri arasındaki sürtünme) ne kadar yüksek olursa deformasyona karşı gösterilen dirençte o kadar fazla olacaktır.

Agreganın içsel sürtünme direnci;

- Danelerin yüzey pürüzlülüğü ve köşeliği arttıkça
- Karışımın boşluğu azaldıkça

Önemli bir artış göstermektedir.

Bitümlü sıcak karışımların üzerinde etkisi olan diğer bir önemli husus ise “sıcaklık”tır aşağıdaki gibi sırlanabilir.

- Karışımın ısısı arttıkça, agreganın asfalt absorpsiyonu artacağından dolayı agrega/asfalt adezyonu artarak karışımın stabilitesi artmaktadır.

- Karışımın ısısı arttıkça işlenebilirlik artmaktadır.
- Karışımın sıcaklığı arttıkça, bitümün viskozitesi düşerek karışımın sıkışmaya karşı yeteneği azalmakta ve böylece daha kolay ve daha iyi sıkışma sayesinde karışımın yoğunluğu artmaktadır.
- Mevsimin sıcak olduğu zamanlarda (yaz ayları) asfaltın termoplastik bir malzeme olması nedeniyle ısı absorbe ederek deformasyon direnci azalmaktadır. Sıcaklığın artması nedeniyle kaplamalarda kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda, asfaltın viskozitesi artacağından dolayı gevrekleşir ve kaplamada düşük sıcaklık çatlakları meydana gelir.
- Sıcaklığın artışıyla karışımın kohezyonu azalmakta ve dolayısıyla stabilitesinde azalmaktadır.

Karışımlarda “**eylemsizlik direnci**”, asfalt karışım kütlelerinin trafik yükleri altında yer değiştirmeye (ötelenmeye) karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

Genel olarak;

- Yükün miktarı azaldıkça
- Yükleme hızı arttıkça
- Kaplamanın kalınlığı arttıkça eylemsizlik direnci artmaktadır (Tunç, 2004, Arslan, 2014).

Bitümün rijitlik modülü; Sıcak asfalt karışımlar, viskoelastik (zamana bağlı yer değiştirme ve elastik toparlanma) ve termoplastik (ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında tekrar sertleşen) malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Bitümün rijitlik modülü, uygulanan gerilme kuvveti ve bu kuvvetin oluşturduğu deformasyon miktarı ile Eş. 2.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S(t, T) = \sigma / \epsilon \quad (2.2)$$

Rijitliğe etki eden iki önemli faktör ısı ve yükleme süresi yani yükleme hızıdır. Bitümün sıcaklığı ve penetrasyonu azaldıkça rijitlik artar. Karışımların rijitliği aşağıdaki test metotları ile saptanabilir.

- Sünme testi
- Serbest basınç veya çekme testi
- Esneklik modülü testi (3-eksenli test, tekerrür yükü)

- Dinamik modülü testi (ASTM D 3497).
- Dolaylı çekme testi (ASTM D 4123), (Tunç, 2004)(Arslan, 2014).

Bitümün dayanıklılığı (durabilitesi); Bitümlü Sıcak karışımların trafik ve çevre şartlarının aşındırma etkisine direnç göstermesi kabiliyetine dayanıklılık olarak tanımlanır. Sıcak asfalt karışımların özelliklerinin değişmesi (yaşlanma, sertleşme), agregada danelerinin kırılması, ufalanması ve bitümün agregada yüzeyinden soyulması gibi etkilere karşı dirençli olmalıdır.

Durabilite genel olarak;

- Yüksek bitüm oranı
- Sert bitüm ve kalın filim tabakası
- soyulma direnci yüksek
- İyi sıkışma (düşük boşluk oranı ve geçirimsizlik)
- Yoğun graülometreye sahip ile artış gösterir.

Bitüm miktarının optimuma kadar artması halinde karışım içerisindeki boşluklar azalarak stabilite artarken su ve hava daha az gireceğinden dolayı asfaltın yaşlanması (oksidasyon) geciktirilerek dayanıklılık arttırılmış olur. Bitüm miktarı azaldıkça agregalar arasındaki bağ kuvveti azalacağından dolayı trafik etkisi ile agregalar karışımdan koparak kaplama yüzeyinde bozulmalara neden olur. Ancak bitüm miktarı fazla olursa sıcak havalarda kuma-terleme ile kaplamanın kayma direnci azalmaktadır. Sıcak asfalt kaplamalarının aşınması ağır taşıt trafiğinin hacmi ile artar. Bu nedenle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda yüksek durabiliteli sıcak asfalt karışımların imal edilmesi gerekir. Ayrıca yüksek standartlı yollarda, ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda, tırmanma şeritlerinde, durma ve kalkmaların yoğun olduğu kavşak, otobüs durağı gibi yerlerde stabilitesi ve durabilitesi yüksek olan sıcak asfalt karışımlara kullanılmalıdır (Arslan, 2014), (Tunç, 2004).

Yorulmaya Karşı Direnci; Asfalt kaplama karışımların, trafik yükleri altında tekrerrür eden eğilmeden (kalıcı olmayan deformasyon) dolayı çatlamalar oluşmadan gösterdiği dirençtir. Sıcak asfalt karışımlarda gradasyon, yoğunluk, kaplama kalınlığı ve bitümün viskozitesi arttıkça yorulma direnci artmaktadır (Tunç, 2004,Orhan, 2012, (Arslan, 2014).

Esneklik (Fleksibilite); bitümlü sıcak kaplamaların esnekliği, temel, alt temel ve zemin tabanından gelen geçici oturmalar uyum sağlayıp çatlamadan eğilebilme

(kalıcı olmayan deformasyon) kabiliyetidir. Bitüm içeriği arttıkça, rölatif açık gradasyonlu karışıma sahip olundukça esneklik artış gösterir. Esneklik artarsa stabilitesinin de azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır (Tunç, 2004), (ORHAN, 2012).

Geçirimsizlik; Asfalt kaplamanın içinden hava ve suyun geçişine olan direnç olarak tanımlanır. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma çözülme tekerrürü arttıkça agrega parçalanması meydana gelir. Geçirimsizlik arttıkça kayma direnci azaldığından dolayı sürüş emniyeti de azalmış olur. Bitüm miktarı arttıkça, karışım yoğunluğu arttıkça, sıkışma arttıkça geçirimsizlik artmaktadır (Tunç, 2004), (Orhan, 2012).

Kayma Direnci; araçların kurplarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması ve frenleme sırasında emniyetli bir şekilde durabilmesi için teker ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Asfalt kaplamaların makro ve mikro yüzey dokusu agreganın durabilitesine yani aşınma ve cilalanma direncine bağlı olarak zamanla azalabilmektedir. Kaplamada yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta fakat kayma direnci azalmaktadır. Yol yüzeyinin makro dokusu ise yol yüzeyi üzerinde yağmur suyu veya başka nedenle biriken suyu uzaklaştırarak, su yastığı oluşmasını önler ve yüksek taşıt hızlarında yeterli seviyede kayma-sürtünme katsayısına ulaşılmasını sağlar. Diğer bir deyişle, iyi bir kayma direncine sahip asfalt kaplama; her hava koşulunda, kabul edilebilir bir mesafede taşıtın durabilmesi için, yeterli sürtünmeye sahip kaplamadır. Düşük bitüm miktarı, cilalanma direnci yüksek agrega, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega, açık ve kaba gradasyonlu karışım ile artmaktadır. Çizelge 2. 1’de düşük kayma direncini oluşturan nedenler ve bunun etkileri verilmiştir

Çizelge 2.1 Kayma direncine etkileyen faktörler

Sebeup	Etki
Bitüm % si fazla olması	Kusma terleme, düşük kayma direnci
Agrega gradasyonun iyi olmaması	Çok düzgün yüzeyli kaplama, suyun yüzeyden drene olmaması ve düşük kayma direnci
Agrega cilalanma değerinin düşük olması	Pürüzlülüğün azalması ve düşük kayma direnci

Testlerde agrega boyutunun kayma direnci üzerinde çok önemli rol oynamadığı görülmüş olsa da, agrega boyutu arttıkça kayma direnci artmaktadır. Optimumdan fazla bitüm kullanılması hem stabilizeyi düşürür hem de terleme kuma ile kaplama yüzeyine çıkan asfalt bitüm oluşturduğu film tabakası ile kayma direncini azaltmaktadır (Tunç, 2004), (Arslan, 2014).

İşlenebilirlik; bitümlü sıcak karışımın hazırlanması, serim ve sıkıştırma sırasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. iri agreg a miktarı art tı kça, maksimum dane boyutu art tı kça, kırmataş agreg a kullanıldıkça, agreg a yüzeyinin pürüzlüğü ve kırılmışlığı art tı kça, karışım ısısı düştükçe, bitümün penetrasyonu düştükçe (sertleştikçe), bitümün viskozitesi art tı kça, filler miktarı aşırı art tı kça ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı art tı kça işlenebilirlik azalmaktadır.

Sıcak asfalt karışımlar ne kadar çok işlenebilir ise (işlenebilirliği çok) o kadar kolay sıkışmakta, kolay sıkışan karışımlarda da trafik altında o kadar çabuk ve kolay oluklanmalar meydana gelir. Bu nedenle son zamanlarda üstyapı tasarımcıları işlenebilirliği az (zor sıkışan) bitümlü sıcak karışımı tercih etmektedir (Tunç, 2004), (Arslan, 2014).

2.5.3. Esnek üstyapılarda Meydana Gelen Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışımların tasarımı, imalat (taşıma, serme ve sıkıştırma)-malzeme kalitesi oldukça önemlidir ve üstyapının performansı bu hususlarda sağlanan yeterlilik dereceleri ile yakından ilgilidir. Veya esnek üstyapı, hizmet vereceği şartlara göre tasarlanmalı, imalat aşamasında (plentte ve yolda) şartnamelere sağlanmalı ve kullanılan malzeme gereken özelliklere sahip olmalıdır. Günümüzde trafik ve dingil ağırlıkları artmakta olup buna karşı trafik yükleri altında çatlamayacak ve plastik deformasyona (kalıcı) uğramayacak stabiliteye sahip, temel veya alt temel tabakasında oluşacak oturmalara uyum sağlamak açısından yeterli derecede esnek ve sürüş güvenliği açısından yeteri kadar sürtünme katsayısına sahip kaplamalar hizmete açıldıktan sonra trafik etkisi, yapım ve tasarım hatalarının etkisi, malzeme hatalarının etkisi, iklim ve çevre etkisi ile üç tip bozulma meydana gelir. Şekil değiştirmeler (deformasyonlar), çatlamalar ve ayrışmalardır. (Arslan D, 2010), (Kabadayı, 2019).

2.5.3.1. Deformasyonlar

Trafiğe açıldıktan bir süre sonra görülen yapısal bozukluklar, bunlar kalıcı deformasyonlar (kalıcı şekil değiştirmeler) şeklinde olup yol eksenini boyunca veya belirli kesimlerde yolun tüm kesitinde veya belirli kısımlarında bölgesel olarak görülebilmektedir. Sürüş konforu ve emniyet açısından önemli sakıncaları olan bu tür bozulmaların, kaplamanın hizmet seviyesini yani performansını düşürmeden onarılması

gerekir. Kalıcı Őekil değiştirmeler (deformasyonlar) genel olarak dūřuk stabiliteli sıcak asfalt karışımların imalatından kaynaklansa da

- Kaplama tabaklarının iyi sıkıştırılmaması
- Karışımda (genel olarak Aşınma tabakasında) fazla filler ve bitüm kullanımı
- Alt tabakalarda ve zeminde aşırı hacim değişikliğinin olması
- Yetersiz tabaka kalınlıklarının oluşu
- Drenaj Yetersizliği

gibi etkenlerin de olduğu göz önüne alınmalıdır (TUNÇ, 2004)

a) Tekerlek izleri (olukları veya kanalları);

Tekerlek izi hava sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık rastlanan bir bozulma türüdür. Bu tip bozulmalar

- Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı
- Hava sıcaklığı yüksek
- Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti
- Aşırı bitüm ve filler yüzdesi
- Yüksek penetrasyonlu bitüm
- Yuvarlak dere malzemesi
- Yetersiz sıkışma

gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür bozulmalar hızlı taşıtlar için sürüş emniyet için tehlikeli iken düşük hızda seyahat eden taşıtlar için sürüş konfor bozukluğuna sebep olmaktadır. Soğuk havalarda oluklarda biriken suların donması tehlike yarattığı gibi kaplamanın içine sızdırarak agreganın soyulmasını ve bitümün oksidasyonunun artmasına sebep oluyor. Bu tür bozulmalarının onarımı zor olsa da bazı kurumlar soğuk asfalt veya yoğun asfalt betonu ile doldurup sıkıştırıyorlar (Tunç, 2004). Şekil 2.6’da tipik bir tekerlek izi oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Tekerlek izi oluşumu

b) Üniform olmayan yüzey deformasyonlar (bozukluklar);

Genel olarak bu şekil deformasyonlar, zemin ve temel tabakalarındaki oturmalarından kaynaklansa da

- Zemin mukavemeti düşük
- Düşük temel tabakası stabilitesi veya boşluklu gradasyon
- Drenaj yetersizliği
- Su seviyesi yüksek ve don derinliğinin fazlalığı
- Zeminden temel tabakalarına kil yükselmesinin olumsuz etkileri
- Banketlerin yanal desteğinin az olması
- Yetersiz kaplama kalınlığı

gibi nedenlerde önemli etkenleri göz önünde alınmalıdır. Bu tip bozulmalar yolun tümünde yolun büyük bir kısmında enine ve boyuna yönde farklı şekilde sistematik olmayan bir şekilde dalgalı olduğu için bölgesel tamir veya onarım ile giderilmesi zordur.

c) Oturmalar (bölgesel çökme)

Bu tür bozulmalar kaplama tabakasına bağlı olmayan kaplama altındaki malzemelerde (alt tabakalarda) meydana gelen bozulmaların yüzeye yansımasıdır. Oturma bozulmalara en büyük farkı eğrilik yarıçapının büyük olmasıdır.

Oturmalar aşağıdaki nedenlerden meydana gelir:

- Alt tabaka kalınlıklarının yetersiz olması,
- Doğal zeminde meydana gelen oturmalar,
- Banketlerden gelen yanıl desteğın az olması,
- yeraltı su seviyesinin yüksek olması
- Drenaj sistemin yetersiz kalması gibi nedenlerden oluşmaktadır. Bu tur bozulmalar ancak alt tabakaların yeterli olarak projelendirilmesi ile önüne geçebilir (Kabadayı, 2019).

d) Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya yığılmalar)

Bu tür deformasyonlar bitümlü tabaklarında stabilite yetersizliğinden dolayı meydana gelir. Bu tur bozulmalar kaplamalarla ilgili olup, bu deformasyonlar, trafik ışıkları, kavşaklar, otobüs durakları, aşırı eğimli, tırmanma şeritleri vb ondülasyon şeklinde görülür.

Ondülasyonlar;

- Stabılıtesi düşük karışımlar
- Aşınma tabakasının yetersiz kalınlığı
- Penetrasyonu yüksek asfalt
- Zayıf yapıştırma tabakası
- Binder tabası eksikliği
- Çok dik kesimlerde ağır taşıtların durma ve kalkma hareketi
- Kavşaklarda, otobüs duraklarında vb. kesimlerdeki frenleme v kalkma hareketlerin yoğun olması.

Bu tür deformasyonların onarılması, bölgesel olduklarından dolayı bozulmuş kısmı kazıyıp yeni malzeme ile serip sıkıştırılarak tamir edilir (Tunç, 2004) (Kabadayı, 2019).

e) Kabarmalar

Bu tür deformasyonlar donma-çözünme etkisi ile zeminde kabarmalar meydana gelmektedir. Yol kaplamasında yer yer yukarıya doğru deformasyonlar oluşur bunu onarımı için kaplama altına uygun kalınlıkta dona duyarsız seçme malzeme tabakası

konulması, drenaj ve stabilizasyon vb. tekniklerle don kabarması ve şişme gibi olumsuz etkiler düşünölmeli ve dikkate alınmalıdır.

2.5.3.2. Ayrışmalar

Çeşitli etkiler sebebiyle (trafik ve iklim etkisi) aşınma tabakasındaki küçük parçaların ayrışması sonucu lokal çukurlar ve kopmalar şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega danelerinin kopması meydana gelir. Ayrışma genel olarak

- İmalat hataları
- Kalitesi Düşük malzeme, ısı ve segregasyon
- Uniform (homojen) olmayan karışım ve sıkıştırma
- Su ve kil etkisiyle soyulma
- Yetersiz veya yüksek penetrasyonlu bitüm (yetersiz adezyon)

gibi nedenlerden oluşur. Bu tür bozulmalar zamanında önlenmez ise gitgide alan ve derinlik olarak artış göstererek kaplamanın yeniden yapılması zorunlu hale gelebilir (Tunç, 2004).

a) Çukurlar

Çukurlar farklı çap ve derinlik şeklinde olup, genel olarak kaplamanın ayrışmaya karşı düşük dirençli oluşundan kaynaklanır. Bu düşük ayrışma direnci,

- Karışımnda bitüm miktarının az olması
- Aşınma tabakası kalınlığının az olması
- İnce malzeme miktarı çok az ya da çok fazla olması
- Alt tabakalarda drenaj yetersizliği

gibi nedenlere bağlıdır (ERDOĞAN, 2019).



Şekil 2.6 Tipik bir çukur bozulması

b) Kaygan yüzeyler

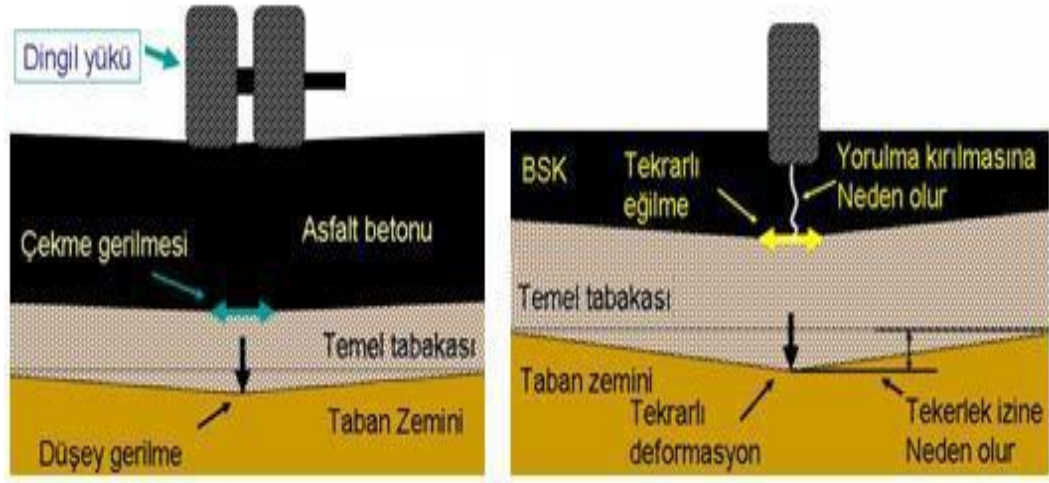
Bu tip bozulmalar da sürüş emniyeti yönünden çok büyük tehlikeler meydana getirir. Bu bozulmalar; agregası soyulması, agregası cilalanması ve bitüm terleme veya kusması ile oluşur. Soyulmalar; agregası ile bitümlü bağlayıcı arasındaki adezyon (yapışma) bağının zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilir. Kusma; sıcak asfalt karışımların şartnamede belirtilen boşluk oranını sağlamaması durumunda sıcak havalarda bitümün yüzeye çıkması ve kaplamanın sürtünmesinin azalması şeklinde karşımıza çıkar (Kabadayı, 2019).

2.5.3.3. Çatlaklar

Çatlamlar çevre, iklim ve kaplama yüzeyinden aşırı dingil yüklerinden ve bunların tekrarının etkisiyle farklı şekillerdede, derinlikte ve genişlikte oluşan bozulmalardır. Çatlamlar genel olarak

- Stabilitate çatlakları
- Yorulma çatlakları
- Yansıma çatlakları

olarak üç sınıf olarak incelenir (KABADAYI, 2019).



Şekil 2.7 Esnek üstyapısı ve oluşan bozulmalar (Kabadayı, 2019)

Stabilite çatlakları; trafik yükleri (ağır taşıtlar) altında kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde kaplamanın alt kısmında başlayıp zaman içerisinde kaplama yüzeyine çıkması sonucu oluşmaktadır. Stabilite çatlakları yapısal çatlaklardır. Trafik yükleri etkisinde kaplamanın her tabakasında hem basınç hem de çekme gerilmeleri oluşmakta, çekme gerilmesi tabakanın altında maksimum iken basınç gerilmesi tabakanın üstünde maksimum olup çekme gerilmeleri kaplamanın çekme mukavemetini aştığında çatlaklar oluşmakta ve trafik yüklerinin tekrerründen zamanla tabakaların üst tarafına doğru ilerlemektedir.

Yorulma çatlakları; dingil yüklerinin aynı noktaya birden fazla etki etmesi ile kaplamanın çekme mukavemeti aşması sonucunda oluşmaktadır.

Yansıma çatlakları; bozulmuş bir rijit kaplamanın üzerinde takviye tabakası olarak inşa edilen bitümlü sıcak kaplama tabakasında oluşmuş çatlakların trafik ve iklim etkisiyle yaklaşık 45° lik açıyla en üstteki tabakaya kadar ilerlemesi yani alttaki çatlakların yüzeye yansıması sonucu oluşmaktadır.

Stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları genel olarak ağır trafik yüklerinden oluşurken çevre ve iklim etkisi ile (sıcak ve nemin değişmesi sonucu) oluşan büzülme veya düşük ısı çatlakları ise trafik etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelmektedir. Çatlaklardan hava ve suyun girmesi büyük sakıncalar ortaya çıkar, bitümlü bağlayıcı oksidasyona uğrar kaplama sertleşir büyük çatlaklar meydana gelir (Tunç, 2004).



Şekil 2.8 Yansıma çatlağı

a) Timsah sırtı çatlaklar

Kaplamanın birbirine bağlı değişik bloklar halinde tüm kesitinde veya belirli bir kesiminde oluşmaktadır. Bu tür bozulmalar genel olarak stabil olmayan zemin, yetersiz drenaj ve alt tabakaların yetersiz olması nedeniyle meydana gelir (ERDOĞAN, 2019).



Şekil 2.9 Timsah sırtı çatlaklar

a) Kenar çatlakları

Kenar çatlakları genellikle banketlerin yeteri kadar yanal destek sağlamaması sonucu banket kenarından 30-50cm içerde boyuna ve sürekli olan kenar çatlağı, banketlerin oturma, yetersiz banket drenajından ötürü don kabarması veya büzülme gibi hacim değişmesi, vb nedenlerden meydana gelir.



Şekil 2.10 Kenar çatlağı (Kabadayı, 2019)

b) Ek yerleri (Derz) çatlakları

Derz çatlakları, inşaat sırasında iki şeridin bindirme yetersizliğinden dolayı veya mesai sonlarında serimin tamamlanması ile enine oluşan ek yerlerinin (derzlerin) sıkıştırma tekniğine uygun olmayan işçilik ve sıkıştırma ile yapılması halinde zamanla oluşmaktadır.

c) Kayma (Ötelenme) çatlaklar

Taşıt lastiklerinin kaplamaya yaptıkları yatay kuvvetlerin etkisi ile tabakalar arasında kayma neticesinde oluşur. Kaplamada görülen kayma yatay eğimlerde ve kavşaklarda taşıt hareketi yönünde, küçük yarıçaplı kurplarda merkeze ters yönde ve yokuş aşağı kesimlerde taşıt yönünde meydana gelmektedir. Bu tip kusurlar genel olarak

- Tabakalar arasındaki yetersiz yapıştırırmadan ötürü zayıf bağ kuvvetinin olduğu yerlerde

- Frenleme kuvvetlerinin yoğun olduğu yol kesimlerinde (dik yokuş, kavşak vb.) meydana gelmekte ve ötelenmeler oluşmaktadır.

d) Büzülme çatlakları

Büzülme çatlakları kaplamanın kendi içinde veya temelde veya zeminde oluşan hacim değişikliklerinden meydana gelir. Timsah sırtı çatlaklar genel olarak üniform bloklar halindeyken bu tip çatlaklardaki bloklar genel olarak değişik şekil ve boyutta olup üniform değildir. Ayrıca yüksek bitüm içeriğine sahip düşük penetrasyonlu ve ince agregası yüksek sıcak asfalt karışımlarında genel olarak daha çok görülür.

e) Enine çatlaklar

Bu tür çatlaklar yol eksenine dik olarak oluşan çatlaklardır. Köprü yaklaşımlarında ve sanat yapıların civarında sıkışma yetersizliği, dolgusu uygun yapılmamış, kısa yük transfer tablası vb bu tür çatlakları oluşturabilir. Bunların dışında finişerin uzun süre duraklaması ve sıcaklığın anı olarak değişimden dolayı kaplamada meydana gelen gerilmelerden kaynaklanan çatlak tipidir.

f) Yansıma Çatlakları

Eğer bozulmuş esnek kaplama ve rijit kaplama üzerinde takviye olarak sıcak kaplama yapılırsa zamanla asfalt kaplama yüzeyinde yansıma çatlakları oluşmaktadır. Buzulmuş tabakanın çatlakları yanal genleşme ve büzülme veya trafik yüklerinin çatlatmış tabakada düşey hareket yaratarak alt tabaka çatlağını yansıtarak zamanla kalınlığınca çatlak ilerleyerek üst tabakanın yüzeyine kadar çıkmaktadır. Alt tabakadaki çatlaklar hareketleri

- Düşük ısılar
- Günlük ısı değişimleri
- Trafik yükleri

gibi nedenlerden oluşmaktadır (Tunç, 2004).

2.5.3.4. Düşük ısı çatlakları

Düşük sıcak çatlakları asfalt kaplamanın büzülmesiyle oluşmaktadır. Düşük sıcaklık çatlakları başka bozulma çatlaklarının farklı bir şekilde kendisini göstermesidir. Üstyapıda oluşan bu bozulma çatlakları eğer zamanında tamir edilmez ise farklı tip

çatlaklara dönüşür ve üst yapıda büyük tehlikeler meydana getirir. Düşük sıcaklık çatlakları genel olarak

- Asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan
- Kaplamanın tüm kalınlığınca oluşan

olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan kılcal çatlaklar bitümlü bağlayıcının ısı etkisiyle büzülerek yarattığı çekme gerilmeleri ile oluşurken kaplamanın tümünde oluşan çatlaklar ise, don etkisiyle kabaran zeminin yarattığı çekme gerilmeleri ile meydana gelmektedir (Tunç, 2004).

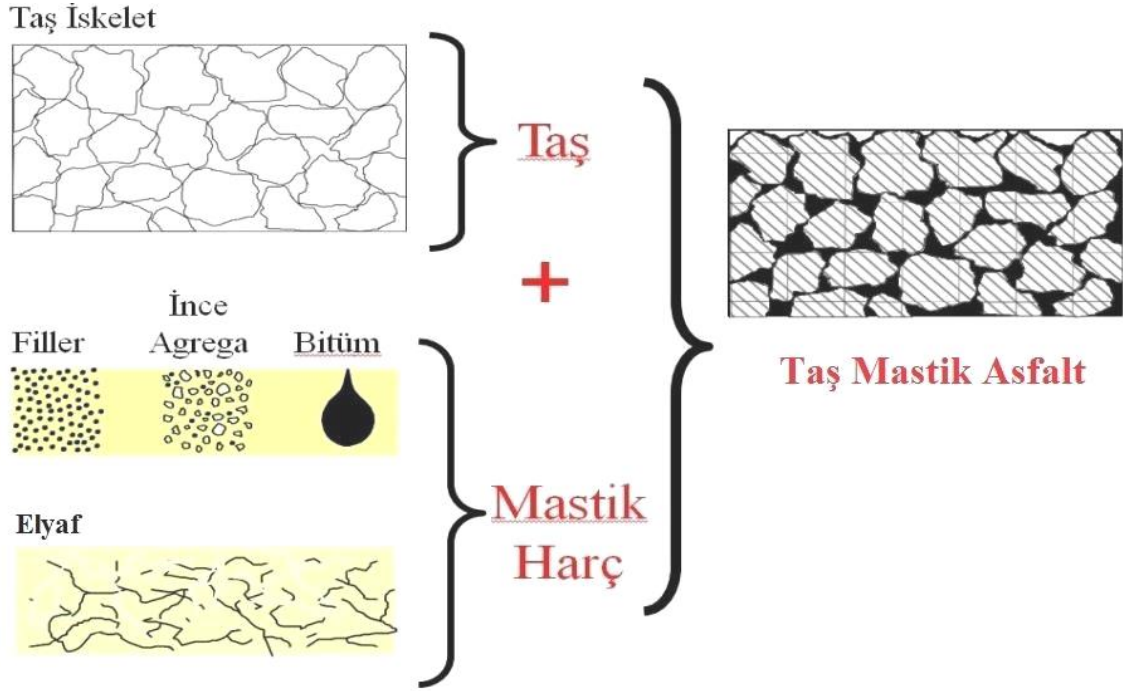
2.6. Taş Mastik Asfalt Karışımlara Genel Bakış

2.6.1. Taş Mastik Asfalt Tanımı ve Tarihçesi

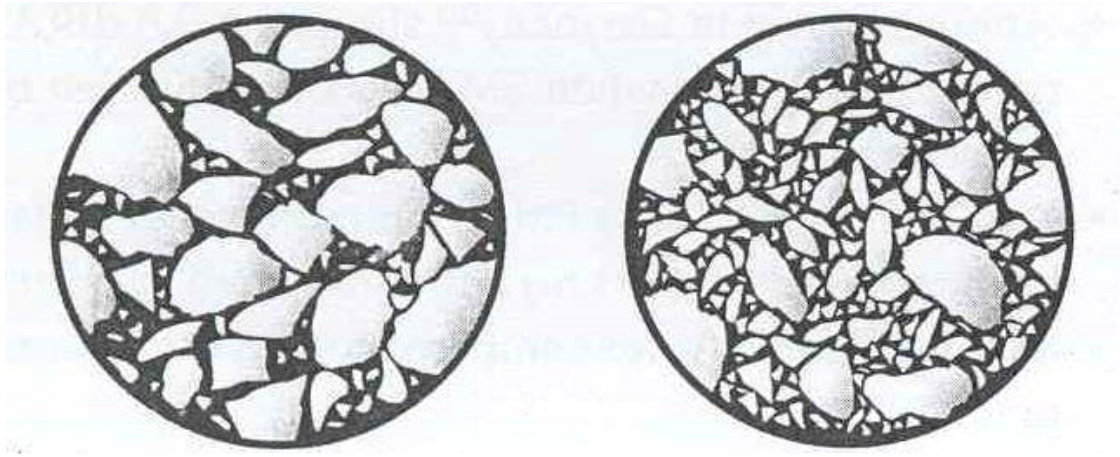
Bitümlü Sıcak Karışımların (BSK) bir türü olan Taş Mastik Asfalt (TMA) çivili lastiklerin aşındırıcı etkiye sahip olması sebebiyle bu etkilere karşı koymak için yeterli dirence sahip olarak Almanya'da geliştirilmiştir. TMA'nın iskeleti iri agrega ve boşluklara doldurulan mastik harcın birleştirmesiyle meydana gelmiştir. TMA'nın yapısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir. İri agrega yük aktarımını sağlayan (aktif) büyük agrega danelerinden teşkil edilir ve pasif (yük aktaramayan) Mastik harç ince agrega, filler, bitüm ve stabilizör elyaf malzemelerinden oluşmaktadır. İnce agreganın kullanımı iri agregaların arasındaki boşlukları doldurmak ve kaba agrega danelerinin etkileşimlerine katkı sağlamaktır (Arslan F, 2014; İzol, 2020).

TMA karışım veya Almanca'da Splitt mastix asphalt, 1960'ların ortalarından beri bilinmektedir. Strabag Bau AG'de Yol İnşaatı için Merkez Laboratuvarı yöneticisi ve Alman mühendis Dr. Zichner, TMA'yı keşfetmişlerdir. Amaç çivili lastiklerin neden olduğu aşınma tabakalarında oluşan bozulmaları önlemektir. TMA'dan önce Almanya'da da aşınmalara karşı koymak için Gussasfalt (yani mastik asfalt) ve düşük iri agrega içerikli asfalt betonu kullanılmaktaydı. İri agregası az olan mastik asfaltta kısa sürede kaplamada tekerlik izleri görülmekteydi. Her iki bileşen, mastik ve ince agregalar, karışıma uygun dayanıklılık sağlamak için çok zayıftı. Yol kaplamaları hızlı aşındığından sık bakım gerektiriyordu ve maliyet olarak ekonomik değildi. Dr. Zichner çivili lastiklerin neden olduğu aşınmaya dayanıklı ve aynı zamanda uzun bir hizmet ömrüne sahip olacak kadar sağlam bir asfalt karışımı tasarlamak için çalışmalara başlamıştır. Dinamik parçalanmaya veya ezilmeye dirençli iri agrega tanelerinin aşınma

direncini sağlamak için hazırlanan karışımların ana bileşenleri olmaları gerektiği düşüncesiyle ilk fikir gelişmeye başlamıştı (Blazejowski, 2011).



Şekil 2.11 TMA genel yapısı



Şekil 2.13 TMA ile geleneksel BSK yüzey kesit alanı

1975 yıllarında çivili lastikler bazı Avrupa ülkelerinde yasaklamış fakat TMA kaplamalar unutulmamış ve çok fazla olmasa da kullanılmaya devam etmiştir. Uygulamadan alınan sonuçlara göre TMA sadece tekerlek izine karşı bir kaplama tipi değildir aynı zamanda uzun hizmet ömrüne sahip, ağır trafik altında yüksek dayanımlı asfalt kaplama olarak kabul edilmiştir. TMA aşınma tabakasının normal asfalta göre

daha dayanıklı ve uzun ömürlü olduğu tespit edilmiş ve TMA yeniden kullanılmaya başlanmıştır. 1980 başlarında TMA Almanya dışında bilinmiyordu ve başka Avrupa ülkelerinde kullanımı sınırlıydı. EAPA (European Asphalt Pavement Association; Avrupa Asfalt Üstyapı Birliği) tarafından deneme yolu olarak İsveç'te 1974 yılında birkaç yol TMA ile kaplanmıştır. Bu uygulamalardan görülen birçok olumlu sonuç nedeniyle Avrupa ülkelerin bir çoğu TMA kullanımı popüler olmaya başlamıştır. Bugün Avrupa ülkelerinde TMA kullanılmaktadır (Blazejowski, 2011; Arslan, 2014).

Çizelge 2.2'de Avrupa Ülkelerinin TMA kullanımı verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Avrupa ülkelerinde TMA kullanımı (Arslan, 2014; Campbell, 1999)

Ülke	Tarif
Belçika	Yenilenme ihtiyacı olan birçok yüksek trafik hacmine sahip yollar TMA ile tekrar kaplanıyor.
Hollanda	Yaklaşık olarak 1987 yılında kullanılmaya başlandı.
Çek Cumhuriyeti	1991 yılında kullanılmaya başlandı; TMA teknolojisi giderek yaygınlaşıyor.
Danimarka	1982 yılında kullanılmaya başlandı; TMA yüksek trafik hacmine sahip yollarda, havalimanlarında, endüstriyel alanlarda kullanılıyor.
Faroe Adaları	1992 yılında yollarda TMA kullanmaya başladı.
Finlandiya	TMA özellikle trafiği yoğun olan yollarda kullanılır. TMA, çivili lastik kullanımı ve düşük sıcaklıklarda oluşan deformasyona karşı iyi bir direnç gösterdiğinden en iyi yol kaplaması olarak kabul edilir.
Fransa	İnce tabakalı yol yüzeylerinde TMA 'nın yanında iki ayrı karışım daha kullanılıyor.
Macaristan	1983 yılında kullanılmaya başlandı.
İzlanda	Sadece yollarda kullanılıyor.
İtalya	1991 yılında kullanılmaya başlandı.
Norveç	1985 yılında kullanılmaya başlandı. TMA yüksek trafik hacmine sahip yollarda, havalimanlarında, endüstriyel alanlarda kullanılıyor.
Portekiz	1994 yılında kullanılmaya başlandı.
İsveç	Araştırmalar 1974 yılında İsveç'te ele alınmıştır; 1988 yılından beri otoyollarda ve ana arterlerde standart aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır.

TMA karışımlar 1990'ların başında Avrupa dışında uygulanmaya başlamıştır. ABD'de tekerlek izine karşı çalışmalara başlamışlar ve 1990 yılında Avrupa'ya düzenlenen bir Asfalt Çalışma gezisi sonucu olarak TMA'yı incelemişler. İnceleme sonucunda TMA'nın yüksek stabiliteye ve tekerlek izine karşı daha dirençli olduğunu 1991 yılında kendi ülkelerinde deneme yolları yaparak test etmişlerdir. İlk TMA 1991 yılında ABD'de Wisconsin eyaletinde yapılmış ve ardından aynı yılda Michigan, Georgia ve Missouri'de de uygulamalara başlanmıştır. 1997 ortalarına kadar, 28 eyalette 100'ün üstünde projede TMA kullanılmıştır. Ulusal Asfalt Teknoloji Merkezi (NCAT)'de Federal Karayolu İdaresi'nin destekleriyle, 1997 yılında uygulanan TMA projelerinden elde edilen performansın belirlenmesi için etüt yapılmıştır. Etüt yapılan projelerin çoğunluğu 1992-1996 yılları arasında inşa edilen ağır trafikli yol kesimleridir.

Yapılan etütte, TMA karışımlar, ağır trafikli yol kesimlerinde iyi bir performans sağlamıştır. TMA'nın Kuzey Amerika'da popüler hale gelmesi Avustralya, Yeni Zelanda ve Çin gibi diğer ülkelerde TMA'ın yaygınlaşmasına yol açmıştır. Son 20 yılda, TMA küresel bir karışım haline gelmiştir ve asfalt tabakalarının uygulandığı hemen her yerde görülmeye başlamıştır (Arslan, 2014, Blazejowski, 2011).

2.6.1.1. Türkiye’de TMA uygulaması

Türkiye’de ilk TMA kaplamalar 1998 yılında deneme yol kaplaması olarak Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından uygulanmaya başlamış ve 1999 yılında taşıt trafiğine açılmıştır. İlk başlarda maliyeti yüksek olduğundan dolayı bazı kaygılar oluşmuştur. Deneme yollarından alınan olumlu sonuçlar uzun ömre sahip bir kaplama olduğunu göstermiştir.

1997 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü Alman TMA şartnamesinden faydalanarak Türkiye için geçerli ilk TMA şartnamesini yayınlamıştır. 2002 yılında KGM, tarafından Yollar Fenni Şartnamesi’ne yaptığı bir ek ile aşınma tabakası ile ilgili şartnameyi revize etmiştir. Türkiye’de TMA uygulamaların ilk yıllarında maliyetinin yüksekliği, modifiye bitüm imalatında ve teminindeki zorluklar, konunun müteahhitler tarafından iyi anlaşılamaması, yeni fiyat birim tespitinde karşılaşılan zorluklar, önerilen malzemelerin çokluğu ve yaratılan spekülasyonlar nedeni ile TMA, birkaç istisna dışında yaygın olarak uygulanamamıştır.

Türkiye’de ilk TMA deneme kesimleri ise; Ankara-Polatlı-Sivrihisar Yolu (1999), Bala Ayrımı - Kulu Ayrımı Devlet Yolu (1999) kesimleridir. Deneme kesimi dışındaki uygulamalar, Tarsus-Adana-Gaziantep otoyolu, Pozantı-Tarsus otoyolu, Tarsus-Mersin otoyolu, İzmir Çevre otoyolu, Gebze-İzmit otoyolu, Haydarpaşa-Gebze Ekspres yolu, Antalya-Alanya Devlet yolu, Adana-Tarsus-Mersin Devlet yoludur (İzol, 2020, Arslan, 2014, Şanlıer, 2018).

KGM dışında daha sonra 2003 yılında İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSFALT) bu çalışmaları sürdürmeye devam etmiştir. İlk olarak Küçükçekmece Çoban çeşme Kavşağı (havaalanı kavşağı) ve Bakırköy’de Ataköy Kavşağı yapılmıştır (2003). 2007 yılında Metrobüs hattı Avcılar-Cevizli bağ kesimi yapılmıştır. 2008 yılında Metrobüs hattı Cevizli bağ-Zincirlikuyu arası ve Vatan Caddesi, Millet Caddesi yapılmıştır. 2009 yılında Metrobüs hattı Zincirlikuyu-Söğütlu çeşme arası yapılmıştır. TMA’ya ilgi özel sektör asfalt üreticileri arasında da

yaygınlaşmaktadır. Türkiye TMA kullanımında Avrupa ülkeleri arasında 11. sıradadır (İzol, 2020, Arslan, 2014).

2.6.2. Taş Mastik Asfaltın kullanımı ve uygulama alanları

Taş Mastik Asfalt geleneksel asfalta göre daha yüksek kaba agrega ve bitüm içeriğine sahip olduğundan, kaba agrega ile TMA'nın iskeleti oluşturularak, yüksek dane teması ve iç kenetlenme ile trafik yüklerini taşımak amaçlanmıştır. Mastik harç ise iri agrega arasındaki boşlukları doldurarak yüksek bitüm içeriği nedeniyle dayanımı arttırmaktadır. TMA karışımlarda bitüm içeriği yüksek olduğundan daha kalın film tabakası oluşmasından dolayı esneklik artmaktadır. TMA'nın bitüm içeriği fazla olduğundan serme ve sıkıştırma anında bağlayıcının akmasını önlemek amacıyla karışıma eklenen stabilize edici (selüloz veya mineral elyaf), karışımın segragasyonunu önleyerek karışımın daha homojen olmasını sağladığı gibi aynı zamanda fazla bitüm bağlayıcı kullanımına da imkân sağlamaktadır. Böylelikle hem stabilite hem de performans (sürüş konforu ve emniyeti) açısından daha üstün nitelikli bir aşınma tabakası elde edilebilmektedir. TMA kesikli bir gradasyona sahip ve işlenmiş (kırılmış) agrega kullanıldığından dolayı içsel sürtünme direnci artmakta ve tekerlek izi deformasyonlarına karşı daha dirençli olmaktadır. TMA maliyet olarak %20- %30 normal asfalt karışımlardan pahalı olup bunun sebebi ise stabilizör katkıları eklenmesi yüksek bitüm içeriği ve daha dayanıklı agrega kullanılması zorunluluğudur. TMA kaplamalar geleneksel asfalt aşınma tabakalarından daha ince tabakalar halinde uygulandığı için imalatı daha çabuk yapılabilmekte ve daha az bakım gerektirmektedir. Dolayısı ile TMA tabakası, plastik deformasyonlara(kalıcı), aşınmaya karşı daha dirençli, homojen ve geçirimsiz oluşu nedeniyle yüksek kaliteli aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır (Kabadayı, 2019, Arslan, 2014, NAPA, 2002).

TMA karışımlar sadece aşınma tabakası olarak değil aynı zamanda bazı ülkelerde (Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri) binder (orta) tabakalarında da (Splittmastixbinder adıyla) uygulamaya başlanmıştır. Bu tip karışımların binder tabakalarında uygulanmasının getirdiği ilâve maliyete karşılık elde edilen fayda konusunda bazı tereddütler vardır. TMA'nın esas avantajı, sağladığı yüksek kaliteli yüzey özelliği, dayanımı ve kalıcı deformasyona karşı yüksek performansı ile çatlak oluşumuna karşı gösterdiği dirençtir. Binder ve temel tabakaları kalıcı deformasyona karşı yüksek direnç gerektirmezler (Blazejowski, 2011, NAPA, 2002).

TMA'nın özel uygulama alanları aşağıda belirtilmiştir:

Havaalanı kaplamaları; Avrupa Asfalt Kaplama Birliği (EAPA) tarafından hazırlanan bir rapora göre, havaalanı pistlerinin çoğunluğu asfalt karışımlarla kaplanmıştır. TMA kaplamaların yüksek performansı, havaalanı idarelerinin dikkatini çekmesiyle, havaalanı pistlerinde, TMA uygulaması ile yeni bir değişim süreci başlamıştır. Uygulanan denemelerden başarılı bir sonuç elde edilmiş ve böylelikle uygulamaların sayısı giderek artmıştır. (Frankfurt'ta Fraport, Güney Afrika'da Johannesburg ve Gardermoen, Oslo, Norveç). En önemlisi Fraport Havaalanı, yüksek trafik kapasitesi ve yılda 200.000'den fazla olan uçak kalkış-iniş miktarları bakımından, dünyanın en büyük havalimanlarından biridir. Fraport Havaalanında uygulanan TMA karışım sasobit ile modifiye edilmiştir. Daha önce bitüm ile kaplanmış pistlerin kaplanması sökülmüş ve yerinde TMA kaplama ile yenilenmesi iki sene sürmüştü ve bu arada havaalanı hizmet vermeye devam etmiştir (Blazejowski, 2011, EAPA, 1998).

Köprü döşemelerde uygulaması; Köprü yapılarında yüzey kaplaması, bir zemin üzerindeki standart bir kaplama gibi değildir ve olmamalıdır. Temel bir farkı köprülerde ısı değişimi esastır. Örneğin kış aylarında soğuk havadan dolayı kaplamada buzlanma toprak zemine göre daha hızlı ve yoğun bir şekilde kendini gösteriyor. Yapı ne kadar esnek olursa, asfalt tabakaları da o kadar elastik olmalıdır. Köprü döşemeler rijit yapı olduğundan kullanılan kaplamanın yorulma direncinin yüksek modifiyeli bağlayıcı oranının yüksek mastik asfalt olması arzu edilir. Bazı ülkelerde, ince daneli TMA da kullanılmaktadır. (Hollanda, Danimarka, Polonya, Türkiye 15 Temmuz Köprüsü ince TMA ile aşınma tabakası yenilemiştir) (Blazejowski, 2011).

İnce TMA uygulaması; İnce TMA tabakaların teknolojisi dikkate alındığında, sadece agrega karışımının gradasyonu değil, aynı zamanda bağlayıcı miktarı ve türü de dikkate alındığında, standart bir finişerle, 4 cm ye kadar (genellikle 3cm veya daha az) küçük sıkışma kalınlığının elde edilebilmesine izin vermesi gerekir. Normal TMA tabakalarının sahip olduğu performansa benzer özelliklere sahip olmalıdır. Ayrıca, birçok güçlü yönlerine rağmen, ince tabakaların ne kaplamayı önemli ölçüde güçlendirdiğini ne de yorulma ve yansıma (enine) çatlama problemini çözmediğini hatırlamakta fayda var. İnce TMA tabakaları dünyanın her yerinde kullanılmaktadır. Örnek olarak, Arjantin, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, İsveç, Polonya ve diğer ülkeler literatürde mevcuttur. En az 10 yıl çalıştıktan sonra değerlendirilen ince SMA katmanlarının örneklerinden en ilginç olabilir. 1993 yılında Polonya'da 0/6,3 mm

gradasyonla yapılmış 2,5-3 cm kalınlıkta TMA tabakası üzerinde 13 yıl sonra yapılan bir değerlendirmede çok iyi şartlarda olduğu gözlenmiştir (Arslan, 2014; Blazejowski, 2011).

Tipik olmayan TMA; TMA kaplamalar orta tabaka olarak da kullanılan (binder tabakası), sessiz kaplamalar, Kjelbase ve renkli TMA, tipik olmayan TMA tabakalarına örnek olarak gösterilebilir ve kullanılmaktadır. Bu tür kaplamalar Amerika Birleşik Devletleri'nde ve son zamanlarda Splitt mastix binder (SMB) olarak Almanya'da test edilmiştir. Yüksek bağlayıcı içerikleri, genellikle stabilizatörlü polimer modifiyeli bir bağlayıcı nedeniyle, kaplamanın yorulma performansı geleneksel asfalt kaplamalardan kesinlikle daha iyi olduğunu ispatlanmıştır. Poroz (boşluklu) asfaltlar, trafik gürültüsünü engelleyen en etkin karışımlardır. Bu tabakalar bazen iki tabaka olarak inşa edilirler. Ancak bu çözümler pahalıdır. Diğer yandan, kentsel alanlarda uygulanmak üzere, poroz asfalta alternatif olarak Von Bochove ve Hamzah tarafından 2008 yılında TMA karışım dizaynına benzer, hava boşluğu %9-16 oranında olan karışım bulunmuştur. Sessiz TMA karışımlar Almanya'da geliştirmiş ve şimdi başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. TMA'da uygulanan güçlü mineral agregaların iskeleti bazı takipçilerin ilgisini çekmiştir. Bu takipçilerden 1997 yılında Kjell Sardal ve S. Gouw, Kjellbase olarak isimlendirdikleri bir karışım yapmışlardır. Bu karışım %79 iti agrega, %15 kırılmış kum, %6 filler, %5 oranında modifiyeli bitümden oluşan karışımın, geleneksel karışım ile kıyaslandığında, kalıcı deformasyona karşı daha yüksek direnç gösterdiği görülmüştür. Renkli asfalt TMA kaplama, estetik açıdan hoş ve göze hitap eden bir seçenektir. Estetik çekiciliğinin yanı sıra, renkli TMA karışımlar yaya geçitlerinde veya diğer emniyetle ilgili özellikleri vurgulamak için de kullanılabilir (Blazejowski, 2011; Van Bochove , 2008).

Çivili lastik aşınmasına karşı; TMA, 1960'larda çivili lastiklerin aşınmasına karşı bir kaplama yüzeyi sağlamak için geliştirilmiş ve daha sonra çivili lastikler Almanya'da yasaklanmıştır. Bununla birlikte, TMA, çivili lastiklerin yasal olduğu ülkelerde kullanılmaktadır. Bu amaçla, yüksek nominal agrega boyutuna ve aşınma direnci yüksek TMA karışımları tercih edilmektedir. İsveç'te yapılan araştırmalar, TMA'da nominal agrega boyutunun 12 mm'den 16 mm'ye çıkarılmasının çivili lastiklerdeki aşınmayı yüzde 40 azalttığını hesaplanmıştır (NAPA, 2002).

2.6.3. TMA'nın Avantajları;

Polimer modifiyeli TMA karışımlar, ağır dingil yüklerine ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda, uygun maliyetli olabilen yenilikçi karışımlardır. TMA karışım yenilenme süresi daha uzundur. Dolayısı ile geleneksel asfalt karışımlarına göre geliştirilmiş üstyapı performansı ile TMA'nın en önemli avantajı sağladığı uzun hizmet ömrüdür.

TMA'nın avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- TMA, geleneksel yoğun derecelendirilmiş asfalta göre yüksek stabilite ve tekerlek izi oluşumu şeklindeki plastik deformasyonlara karşı yüksek dayanım sağlarlar.
- Kesikli bir gradasyona sahip olduğundan kayma direnci yüksektir. Fren mesafesini kısaltarak emniyetli sürüş sağlamaktadır.
- Normal asfalt için mevcut olan aynı tesis ve ekipman kullanılarak üretilebilir, yerleştirilebilir ve sıkıştırılabilir.
- TMA tabakası, kalıcı deformasyonlara ve aşınmaya karşı daha dirençli, dayanımı fazla, daha homojen ve geçirimsiz oluşu nedeniyle yüksek kaliteli aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır.
- TMA kaplamalar yoğun gradasyonlu kaplamalara nazaran daha sessizdir. Araçların kaplama üzerinden düşük gürültü ile geçmesini sağlarlar.
- TMA ince tabaklar halinde serildiği için daha az agrega kullanılmakta ve aynı zamanda uzun ömre sahip olduğundan dolayı daha az bakım gerektiriyor.
- Düşük sıcaklıklarda iyi performans gösterdiği için kılcal çatlakların meydana gelmesini geciktirirler.
- Uzun vadede maliyeti düşüktür.
- Gece far ışıklarının yansıma yapmasını azaltır.
- TMA üzerindeki trafik işaretlemelerinin görünürlüğünü artırır.

ABD'de uygulanan 85 TMA projesinde üstyapı performansı ve Almanya'daki deneyimler değerlendirilerek, TMA deformasyon, tekerlek izine dayanıklılık, yorulma çatlağına karşı direnç açısından yoğun gradasyonlu asfalttan çok daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişler. Gözlemlendiği bu uygulamalarda Soyulma, sökölme ve yüzey çatlağı (sıcaklık ve trafiğin etkisine bağlı) gibi bozulmalara genellikle TMA'da görülmemiştir. Sonuç olarak bu kaplamalar az bakım gerektiren ve uzun hizmet ömrünü sahiptirler. Düşük sıcaklıklarda iyi performans gösterirler (Şanlıer, 2018; Arslan, 2014; Blazejowski, 2011; AAPA, 1997).

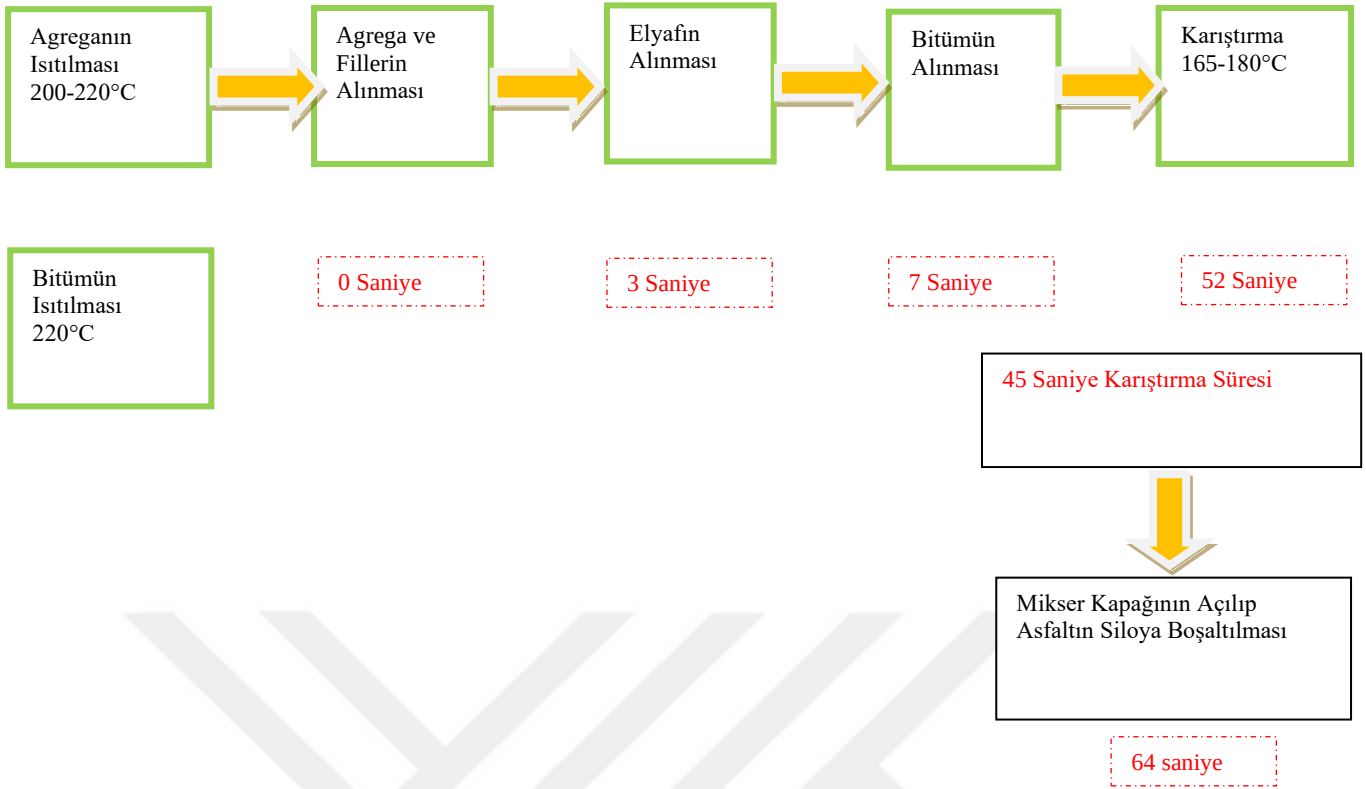
2.6.4. TMA'nın Dezavantajları;

TMA, yapısal ve işlevsel avantajları nedeniyle ağır ve yoğun trafik yüküne sahip yollardaki kaplamalar için en iyi kaplama olarak kabul edilmektedir. Bu olumlu taraflarını karşı kendini has bazı birleşimi ve malzeme özelliği nedeni ile üretim, nakliye, serme ve sıkıştırma açılarından bazı olumsuz tarafları da bulunmaktadır.

TMA'nın dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- TMA'nın ilk maliyeti yüksek, bunun neden ise daha yüksek oranda bağlayıcı ve filler ile stabilize edici katkılardır.
- Fazladan filler ve elyafın eklemesi karışım süresini uzatıyor ve plentin verimliliğini azaltıyor. bu sorun uygun plent modifikasyonları ile üstesinden gelinebilecektir.
- Karışım serildikten sonra bağlayıcının yüzeyde toplanmaması için TMA karışımın 40°C'a kadar soğumadan trafiğe açılmaması gerektiğinden yolun daha uzunca bir süre taşıt trafiğine kapanmasına neden olur.
- TMA kaplama serim ve sıkıştırdıktan sonra yüzeyinde biriken kalın bağlayıcı filmi nedeniyle kayma direnci düşük olup trafikle yok oluncaya kadar düşük hızla seyir etmesi veya kaplama yüzeyinde temiz bir mıcır atılması gerekebilir.
- TMA karışımlarında bitüm içeriği fazla olduğundan üretim, depolama, taşıma ve serme-sıkıştırma işlemleri bitümün akmaması için büyük bir itina gerektirir.
- TMA karışımlarda Polimer kullanıldığında asfaltın sıcaklığı daha yüksek olması gerektiğinden, taşıma mesafesine kısıtlamalar getirilebilir.
- TMA geleneksel asfalt karışımlara göre işlenebilirliği düşüktür. Özellikle modifiye bitüm kullanıldığında, işlenebilirliği düşük olduğundan, sıkıştırma işlemi daha fazla itina gerektirmektedir.
- Yüksek yoğunluklu bağlayıcı (genellikle bu modifiye bitümlerde) ve mastik içindeki elyaftan dolayı, karışım sıcaklığı artar sıcaklık artığında fazla enerji serf etmekte ve bunun beraberinde maliyeti yükselir. Geleneksel bitümlü sıcak karışımlara nazaran, TMA çok sıcak bitümlü karışımdır karışım sıcaklığı 170-190°C arasındadır (Kabadayı, 2019; Şanlıer, 2018;Blazejowski, 2011).

Şekil 2.13 TMA üretim zinciri (Şanlıer, 2018)



2.6.5. Taş Mastik Asfalt(TMA) Üretimi

TMA üretimi birkaç nokta dışında geleneksel asfalt karışımlarla aynıdır, aynı tesisat ve makinelerle üretilir ve serilir. Ancak TMA üretilmesi ve serilmesi sırasında çok itina gerektirir. Aşağıda BSK üretim aşamaları anlatılmakta, gerekli yerlerde ise farklılıklardan bahsedilmektedir. TMA karışımların hazırlanmasında üretim aşamaları bir zincir oluşturur. Bu üretim zincirinde süreler ve sıcaklıklar önemlidir. Şekil 2.14.'te üretim zinciri gösterilmektedir. Bu zinciri azami düzeyde uyulması üretim kalitesini artırır.

TMA üretiminde dikkat alınması gereken hususlar

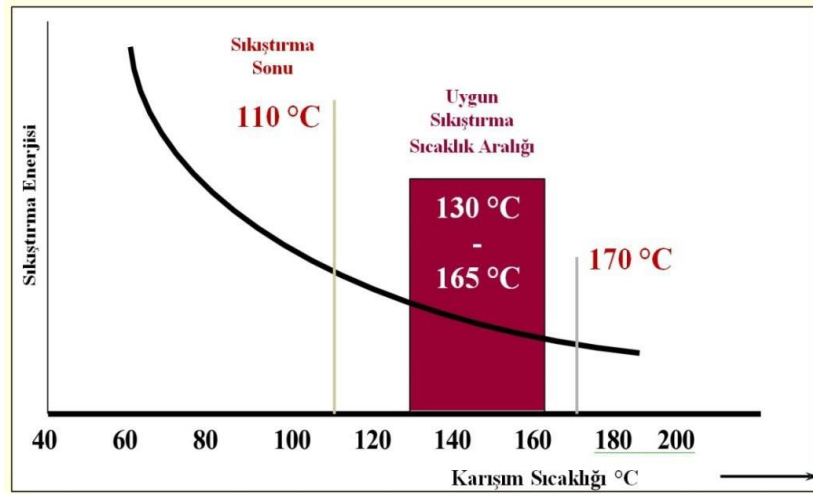
- Bitümlü bağlayıcı ve mineral agregası karışım sıcaklığı 165°C-180°C arasında olmalıdır.
- Elyaf ve filler silodan karıştırıcıya üniform bir şekilde verilmeli.
- Karışıma elyaf ilave edilmesi üreticinin önerdiği şekilde ve elyaf ilavesi nedeniyle artan karıştırma süresi dikkat edilmeli.
- Modifiye bitüm kullanılması halinde karışımın plente modifiye edilmesi, sıkıştırılması ve karışımın karıştırma süresi üreticisinin önerilerine göre ayarlanmalıdır.

2.6.6. TMA Karışımların Serilmesi ve Sıkıştırılması

TMA karışımların serilip sıkıştırmasında aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır (Şanlıer, 2018; Arslan, 2014; NAPA, 2002).

- Uygun bir serme işlemi elde etmek için TMA karışımlar soğuk veya rüzgarlı hava koşullarına yerleştirilmemelidir.
- Karışım sericiye verildiğinde sıcaklığı minimum 145°C -150°C olmalı ve çevre şartları gölgede 10°C altında olmamalıdır.
- Karışımın sıkıştırılması en az iki silindir ve statik ağırlığı 10 tondan az olmamalıdır. Silindirler sericiye en fazla 100 m mesafede çalışmalıdır.
- Silindirin hızı 5 km/saati aşmamalı ve sıkıştırma sırasında silindirin izi kaybolana kadar işleme devam edilmelidir.
- Serilen karışımın sıcaklığı 115°C altına düşmeden önce (ideal 130 °C) silindiraj işlemi tamamlanmalıdır. TMA karışımın serme-sıkıştırma sıcaklığı geleneksel beton asfalta nazaran 10 ila 20°C daha fazla olmalıdır.
- Sıkıştırma payı yoğun gradasyonlu karışımlara kıyasla daha azdır. Yoğun gradasyonlu karışımlar 5 cm'lik sıkıştırılmış kalınlığı elde edebilmek için 6,35 cm kalınlığında serilirler ve kalınlığın 2,5 cm'si başına 0,64 cm sıkıştırılırlar. Buna baş parmak kuralı denir. Fakat TMA karışımlarda sıkıştırma payı yoğun gradasyonlu karışımların yarısı kadardır. TMA karışımlarda kalınlığın 2,5 cm'si başına 0,32 cm sıkıştırılır.
- TMA sıkıştırmasında çelik bandajlı silindirin vibratörünün kullanılmaması tavsiye edilir kullanım durumunda agregaların kırılmasına sebep olabiliyor.
- TMA'da Pünomatik lastikli silindirler kullanılmamaktadır kullanılması durumunda bağlayıcının yüzeye çıkmasına sebep oluyor.
- Finişerin duraklamaları kaplamada olumsuz etkiler ve tur duraklamalardan kaçınılmalı.
- İnce tabaka uygulandığı zaman çabuk soğuduğu için özenle serilip sıkıştırılmalıdır.

TMA karışımların sıkıştırma enerjisi ile karışım sıcaklığı arasındaki bağıntı şekil 2.15 te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 sıkıştırma enerjisi ile karışım sıcaklığı arasındaki bağıntı (Şanlıer, 2018)

2.6.7. Taş Mastik Asfalt Karışım Dizaynı

TMA karışım dizaynı ilk aşaması şartnamelere göre uygun agregada gradasyonu seçimi ve iri agreganın taşın taşa temasını uygun bir şekilde sağlamaktır. TMA karışım dizaynında agregada özellikleri (sertlik, şekli) yoğun gradasyonu karışımlardan daha önemlidir. İkinci en önemli aşaması uygun bağlayıcı ve modifiye katkı seçimi, istenilen kıvamı sağlayan yeterli harcın oluşturulmasıdır. Bu nedenle, agregada daneleri arası boşluk (VMA) ve bitüm içeriği klasik karışımlar için verilen asgari miktarın çok üzerindedir. Uygu bir TMA karışı elde etmek için aşağıdaki verilen dizayn aşamalara takip edilmelidir.



Şekil 2.15 TMA karışım dizayn akış şeması.

KTŞ şartnamesine göre TMA karışım dizaynı için Marshall Karışım Dizaynı kullanılmaktadır. Bu yöntemde, normal bitümlü karışım numuneleri $135^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de, modifiye bitümlü karışım numuneleri $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de numunenin her iki yüzeyine 50 vuruş(darbe) uygulanarak hazırlanmaktadır. Türkiye'de yolların sorumlusu karayolları müdürlüğü teknik şartnamesi karışım dizayn değerleri Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 KTŞ'ye göre TMA tasarımı

Özellikler	Şartname Limitleri
Briketin her yüzünde uygulanacak Darbe Sayısı	50
Hava Boşlukları, (%)	2-4
Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)	3-4
Agregalar Arası Boşluk (VMA) (%), min.	Tip 1 16 Tip 2 17
Tekerlek İzinde Oturma* (30 000 devirde, 60°C 'de), (%), maks.	6
Elyaf Miktarı, %	0,3-1,5
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%), maks.	0,3

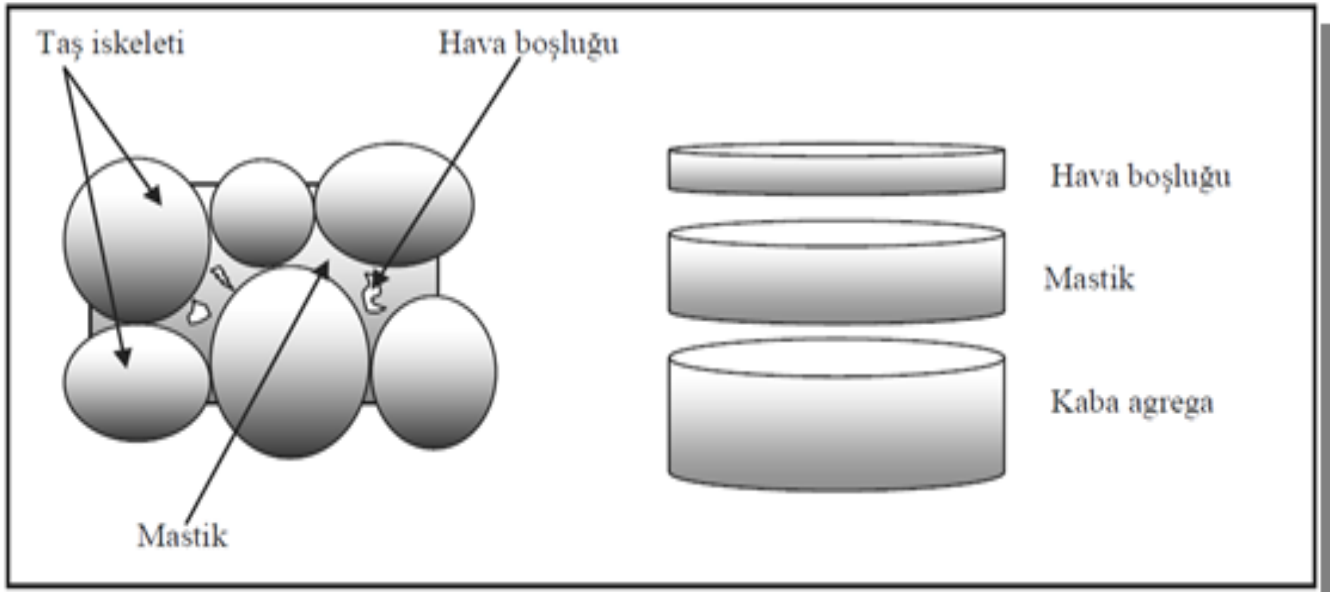
Blazejowski kitabında “Genel kurallar” başlığı altında, “Zichner oranları” (1971) yayınlandığı bir raporda TMA tasarımı için, birtakım öneriler sunmuştur. Bunlar:

- Karışımında kullanılacak agregalar %70-75 kırılmış agregadan oluşması tercih edilir.

- Ana kural karışımında kullanılacak kaba agreganın ince agregadan fazla olmasıdır.
 - Mastik (harç) %20-35 oranında olmalıdır.
 - Mastik %23-28 bitüm bağlayıcıdan oluşmalıdır.
 - Kaplama kalınlığı değiştiğinde farklı agreganın tipi kullanılmalıdır. Aşağıdaki gibi özetlenir.
1. 3cm'den az olan tabaka kalınlıkları için agreganın fraksiyonları 2/5,6 mm agreganın %25 ve 5,6/8 mm agreganın %75 oranında tavsiye edilir.
 2. 3-4,5 cm tabaka kalınlıkları için agreganın fraksiyonları 2/5,6; 5,6/8 ve 8/12 mm ya da sadece 5,6/8 ve 8/12 mm olmalıdır.
 3. 4,5 cm'den büyük tabaka kalınlıkları için agreganın fraksiyonları 2/5,6; 5,6/8; 8/12 mm ve 12/18 mm olmalıdır.
- Mastik harcın içinde sadece işlenmiş kum kullanılmalıdır.

2.6.8. TMA'nın Hacimsel Yapısı

TMA'nın genel yapısını baktığımızdan iskeletini oluşturan iri agreganın ve boşlukları dolduran mastik harcı (iri agreganın, bağlayıcı ve stabilizör katkıları) ile oluşmaktadır. TMA'nın hacimsel yapısı Şekil 2.17'de gösterilmiştir. TMA'nın aşınma tabakası Genel olarak % 70-80 kaba agreganın, % 20-30 ince agreganın ve % 6-7 gibi oldukça fazla bitümlü bağlayıcı, kesikli gradasyona sahip bitümlü bağlayıcı karışımlardan oluşmaktadır. TMA'da karışımlarda kullanılan iri agreganın geleneksel asfalt karışımlarda kullanılan iri agregadan daha sert bir agreganın kullanılmakta ve filler yüzdeleri fazla olup yüksek bitüm içeriğini sahiptir bitüm akmasını önlemek amacıyla stabilizör katkı elyafları kullanılmaktadır. TMA yoğun gradasyonlu karışımlardan farklı iri agreganın iskeleti, agreganın gradasyonu, fazla boşluk oranı ve fazla bitüm içeriğidir. İri agreganın boşlukları dolduran mastik harç bir kısmı ince agregadan oluşmakta, ince agreganın TMA iskeletinin oluşmasında bir katkısı yoktur (İZOL, 2020; ARSLAN F, 2014; Blazejowski, 2011).



Şekil 2.16 TMA'nin hacimsel yapısı (Arslan, 2014)

2.6.9. TMA'da Kaba ve İnce agrega

İri agrega TMA'nın iskeletini oluşturmaktadır. TMA karışımlarda ortaya çıkan direnç kaba agrega oranının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. TMA iskeletini oluşturan iri agrega hacimsel yapısı poroz asfalta benzemektedir. Poroz asfalt kaba agrega ile yüksek miktarda bitümlü bağlayıcıdan oluşan %20-25 boşluk içeren harç ile tasarlanırken, TMA karışımlarda istenilen boşluk %3-6 arasındadır. TMA'nın hacimsel tasarımı geleneksel asfalt betonu ile karşılaştırıldığında en büyük fark, agrega iskeletini oluşturan danelerin birbirleriyle temas halinde olan şeklidir. TMA'da kullanılacak agregalar ülkelere göre değişiklik gösterebiliyor, çoğu ülke kullanılacak agregalar kırılmış oranı %100 istenmektedir.

Kaba gradasyonlu karışım ince gradasyonlu karışımdan daha güçlü bir yapıya sahiptir. Bir karışım gradasyonu seçilirken güçlü ve zayıf yönlerini dikkate alınarak seçilmelidir. Maksimum dane çapı 10 mm'den büyük olan bir karışım, yüksek tekerlek izi direnci ile birlikte düşük gürültü giderme yeteneğine sahip ve zayıf kayma direnci ile karakterize edilir (Altan, 2018; Arslan, 2014). Çizelge 2,4'te TMA kaplamalarında kullanılacak kaba ve ince agrega için bazı ülkelerde istenen sınır değerleri verilmiştir (ALTAN, 2018).

Çizelge 2.4 TMA kaplamalarında kullanılacak kaba ve ince agrega için bazı ülkelerde istenen sınır değerler (Altan, 2018)

Cinsi	Özellikler	KGM	Amerika (FHWA)	İngiltere	Çek Cumhuriyeti-Portekiz
Kaba Agrega	Kısılmışlık Oranı, min.	100	100	100	100
	Los Angeles Aşınma, maks %	25	30		20
	Na ₂ SO ₄ sağlamlık Deneyi, maks %	8	15		
	Cilalanma Değeri, min. %	50	-	55	55
	Su Absorpsiyonu	2,5	2,0		
	Yassılık İndeksi, maks %	25		30	
İnce Agrega	Kısılmışlık Oranı, min.		100	50	
	Na ₂ SO ₄ Sağlamlık, maks %		15		
	Likit Limit, maks %		25		

Çizelge 2.4 te değişik ülkelerde belirlenen şartnamelerde istenen kaba ve ince agrega için sınır değerler verilmiştir.

Çizelge 2.4 te belirtildiği gibi Amerika'da yüksek Los Angeles (LA) değeri %30 ama Çek ve Portekiz'de düşük Los Angeles (LA) değeri %20 istenmektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından hazırlanan TMA şartnamesi çizelge 2.5 verilmiştir.

Çizelge 2.5 KGM'ye göre kaba agrega özellikleri

Deney	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Los Angeles parçalama direnci Maksimum %	25	TS EN 1097 (ASTM C-131)
Na ₂ SO ₄ ile Dayanıklılık Kayıp	8	EN 1367 (ASTM C-88)
Yassılık İndeksi, Maksimum %	25	BS-812
Cilalanma Değeri, minimum %	50	TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti, Minimum %	60*	Kısım 403 Ek-A
Su Absorpsiyonu, Maksimum %	2,0	TS-3526 (ASTM C-127)
Kil Toprakları ve ufalanabilir Daneler, Maksimum %	Bulunmayacak	TS- 3526 (ASTM C-142)
*Soyulma Mukavemeti %60'dan düşük olan taşlar soyulma mukavemetini arttırıcı katkı maddeler kullanılabilecektir.		

(KTŞ)'ye göre TMA için ince agrega özellikleri Çizelge 2.6.'de de verilmiştir.

Çizelge 2.6 KTŞ'ye göre ince agrega özellikleri

Deney	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Plastisite İndeksi	N.P.	TS-1900
Organik Madde, renk skalası	0-1	TS-3673
Organik Madde, %	Bulunmayacak	AASHTO T194

TMA karışımlarda agrega özellikleri kaplama performansını ve hizmet ömrünü etkiliyor. Karışımın hizmet ömrü, yapısında bulunan agreganın cilalanmaya karşı direncine bağlı olup bazı ülkeler agrega cilalanma değerinin %55'den büyük olmasını

istenmektedir. Aynı zamanda karışım içerisinde, yassı dane miktarının artmasıyla karışım performansının azaldığı dolayısıyla yassı dane miktarının karışım performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu söylenmektedir. Ayrıca, yassılık oranı artıkça bitüm miktarı da artmaktadır (Altan, 2018; Arslan, 2014).

2.6.10. Mineral filler

TMA karışımlar kesikli gradasyonlu (gap graded) olduğu için agregalar arası boşluk fazladır bu yüzden mineral filler kullanımı gerekmektedir. TMA karışımlarda bitüm filler gereksinimi geleneksel asfaltlara göre daha fazladır. TMA'da mastik harcı; ince agreg, filler ve bağlayıcıdan oluşmaktadır.

Taş tozu, yüksek fırın cürufu, Portland çimentosu, sönmüş kireç ve uçucu kül Filler malzeme olarak kullanılabilir. Fillerin gradasyonu ülke şartnamelerine ve laboratuvar araştırmalarına göre değişebilmekte olup; Almanya'da 0,090 mm'den geçen kısım mineral filler olarak değerlendirilirken, Amerikan FHWA 0,020 mm'den geçen malzeme yüzdesini %30 olarak sınırlandırmıştır. Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğü'nün TMA şartnamesinde mineral filler için uygun gördüğü gradasyon çizelge 2.7 gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 KTŞ'ye göre mineral fillerin gradasyonu

Elek Boyutu		Geçen (%)
No	mm	
40	0,42	100
80	0,177	85-100
200	0,075	70-100

2.6.11. Bitümlü Bağlayıcılar

TMA karışımlarda bağlayıcı olarak tekerlek izine ve deformasyonlara karşı daha dirençli olması için düşük penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı veya modifiye bağlayıcılar kullanılmaktadır. KTŞ'ye göre TMA üretiminde TS EN 12591 standardına uygun 40/60 ve 50/70 penetrasyonlu bitüm önerilirken, eğer modifiye bitüm kullanılacaksa da KGM Modifiye Bitüm Şartnamesine uygun değerler kullanılacaktır. Modifiye bitüm ağır trafiğe sahip yollarda, gece gündüz mevsim sıcaklık farkı fazla bölgeler veya sıcak bölgelerde kullanılmaktadır. Bağlayıcılar yolların sağlamlığında ve kullanım sürelerinde

hayati öneme sahiptir. Malzemeleri birbirine bağlar ve karışımın yapısal dayanıklılığını artırır. Eğer bağlayıcı uygun değerlere sahip olmazsa yağlayıcı gibi görev yapar ve bu da yollarda tekerlek izi oluşumuna ve diğer bozulmalara sebep olabilir.

Modifiye edilecek bitüm; belirtilen standartları (TS-1081 EN 12591) esaslara uygun 50/70, 70/100, 100/150 ve 160/220 penetrasyonlu olmalıdır. Modifikasyondan işleminden sonra elde edilecek modifiye bitüm, modifiye bitüm teknik şartnamesine uygun olmalıdır. Sıcak iklim bölgelerinde, karışım; polimerler ya da doğal asfaltlar ilave edilerek plentte modifiye edilir. Kaya asfaltları, göl asfaltları, termoplastik polimerler, lateks, granül kauçuk gibi katkı maddeler Modifiye bitüm üretilmesinde modifiye edici madde olarak kullanılır. Önceden de belirttiğimiz gibi bitümün akmasını engellemek için karışıma elyaf eklenmektedir (İzol, 2020; Altan, 2018; Arslan, 2014).

2.6.12. Elyaf

TMA karışımların hazırlaması sırasında fazla bağlayıcı içeriğine sahip aynı zamanda uygulanan yüksek sıcaklık bitümün akmasına sebep olmakta, bitümün akması karışımın mukavemetinde azalmaya sebep olmaktadır. Bitümün akması agreganın üzerindeki bitüm filminin kalın bir tabaka oluşturmaz dolayısı ile yaşlanmaya karşı direnci azalmakta ve kaplamanın ömrü kısalmaktadır. Akmayı önlemek için bir katkıya ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak uygun bir modifiye bitüm kullanılırsa akmayı önleyici katkılara gerek kalmaz. TMA karışımlarda akmayı önlemek için genellikle mineral elyaf (silisik asit, polimer, selüloz, vb.), kaya yünü ve özel organik maddeler fiber olarak kullanılmaktadır (Blazejowski, 2011).

Karayolları teknik şartnamesini göre, elyaf stabilizör, selüloz veya mineral elyaf olmalıdır. Elyaf dozajının müsaade edilen toleransları, gerekli olan elyaf ağırlığının $\pm \%10$ 'u kadardır. Elyaf silodan otomatik karıştırıcıya beslenir. TMA karışımında elyaf, karışım ağırlığının $\%0,3-1$ arasında KGM şartnamesinde belirlenmiştir.

Bu tür olumsuzlukları gidermek amacıyla ilk olarak Almanya'da asbest elyaflar kullanılmış, ancak asbestin insan sağlığına olan olumsuz etkileri sebebiyle yasaklanmıştır. Asbest elyafların kullanımının yasaklanmasından sonra yerine benzer özelliklere sahip selülozik elyaf kullanılmaya başlanmıştır. Selülozik elyaf, pürüzlü ve üç boyutlu yapısı sebebiyle iyi bir bitüm taşıyıcısıdır. Şimdi en popüler olan elyaf katkısı viatop selülozik elyaftır. Şekil 2.18'de viatop elyaf gösterilmiştir (Şanlier, 2018).



Şekil 2.17 Viatop elyaf görünümü (Şanlıer, 2018)

Almanya’da uygulanmış olan TMA projelerinin %90’ında, İsveç’te ise hemen hemen tamamında elyaf kullanıldığı kaydedilmiştir. Alman idaresi, yeterli mukavemete sahip TMA için minimum bitüm içeriğinin %6- %7 belirtmişlerdir. Elyafı ve elyafsız modifiye bitümleri karşılaştırdığımızda polimer modifiye bitüm kullanılan TMA karışımların içerdiği bitüm oranı, elyafı TMA karışımlarından daha düşüktür (İzol, 2020; Şanlıer, 2018; Altan, 2018).

2.6.13. TMA Kalite Kontrol

Esnek üst yapıların kaplamaları trafik, çevre ve iklim değişikliklerine en fazla maruz kalan kısımdır. Ortamda oluşan zorlamalar nedeniyle bu tabakaların özelliklerinin, üretimleri sırasında, taşıma sırasında ve yerleştirilmeleri sırasında şartname sınırları içinde kalması gerekir. Bu ölçütlerin yerine getirilip getirilmediği kalite kontrolleri yapılarak anlaşılabilir. Malzemenin satın alınması aşamasında başlaması gereken kalite kontrollerinin, plentteki üretim, karışımın uygulanacak kesime taşınması, yerine uygulanması, sıkıştırılması aşamalarında özenle tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu sürecin herhangi bir adımında oluşabilecek küçük hata, üstyapıyı başarısız veya kısa ömürlü kılacaktır. Kaplamaların daha iyi sonuç alabilmek için arşıma giren malzemelerin özellikleri farklı olup yada farklı kaynaklardan alınmıştır, işleme girmeden önce deneye tabi tutulup standartlara uygun olup olmadığı tespit edilmelidir. Laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler ve yerinde uygulanacak karışım değerleri çok yakın olmalıdır.

KTŞ'ye göre TMA'nın yapımı sırasında kullanılan malzemeleri ve imalatı kontrol etmek amacıyla belirli aralıklarla yapılması gereken kalite kontrol deneyleri minimum deney sayıları ve sıklığı aşağıda çizelge çizelge'de verilmiştir.

Çizelge 2.8 TMA kalite kontrol deneyleri (KGM, 2013)

Amacı	Deney Adı	Deney Sıklığı	Deney Standardı
tasarım için agrega üretilmesi	Elek Analizi	Kaba ve orta agrega için 200 m ³ 'de bir, İnce agrega için 100 m ³ 'de bir.	ASTM C-136, C-117
Konkasörde agrega üretiminin kontrolü	Elek Analizi (Yaş metod)	min. 400 m ³ 'de bir	ASTM C-136, C-117
Sıcak silo gradasyon kontrolü	Elek Analizi (Yaş metod)	min. günde bir kez	ASTM C-136, C-117
Karışımın fiziksel özelliklerinin kontrolü	Bitüm yüzdesi, Briket hazırlama, Briket özgül ağırlığı, Stabilite, Akma ve Vh, Vf, VMA hesapları	min. günde iki kez	AASHTO T-164, T-30 ASTM D-1559 ASTM D-2726
Segregasyon olup olmadığının tespiti	Bitüm %'si ve Gradasyon	min. günde iki kez	AASHTO T-164 AASHTO T-30
Tabakanın Sıkışma ve Kalınlık kontrolü	Karot alımı, karot özgül ağırlığı tayini	min. her 250 t'dan bir çift	ASTM D-2726

2.6.14. TMA Kaplama Maliyeti

Çoğu ülkede TMA yapımının geleneksel betona göre daha pahalı olduğu belirtilmiştir. Bu ilave fiyat artışı aşağıdaki malzemelerden kaynaklanmaktadır.

- Fazla bitüm içeriği veya modifiye bitüm kullanımı
- Fazla filler kullanımı
- Fazla kaliteli kaba agrega kullanımı
- Stabilizör katkıları (elyaflar)
- Yüksek ısı enerji kullanımı
- Asfalt plantin üretim kapasitesini düşürmektedir

Yaklaşık fiyat farkı, ülkeye ve yerleşimin özelliğine bağlı olarak +%20 ile +%30 arasındadır. Ancak, TMA kaplamaların dayanıklılığı nedeniyle bu tür bir fiyat farkı karayolu idareleri tarafından kabul edilmektedir. TMA karışımların başlangıç maliyeti yüksek, fakat uzun ömürlü, yüksek stabilite, yüksek dayanıklılık ve daha düşük bakım maliyetleri ile dengelemektedir.

Kaplama bakım periyodunu karşılaştırdığımızda geleneksel asfalt karışımlar 10 yıl iken TMA karışımlar 15 yıldır. TMA geleneksel asfalt karışımlardan 5-10 sene daha uzun ömürlü ve uzun vadede daha uygun olduğundan, TMA'nın iyi bir yatırım olduğu açıktır. TMA karışımlar geleneksel asfalt karışımlara göre gürültü seviyesi daha düşük

olduğundan, gürültü bariyerlerin daha az yerleştirmesi gerekir böylece maliyetin daha az olması sebep olmaktadır.

Georgia Ulaştırma İdaresi tarafından yapılan bakım onarım aralıkları analizinde BSK karışım ile beton kaplamanın üzerinde takviye olarak TMA tabakası karşılaştırmış ve aşağıda çizelge 2.9’da gösterilmiştir. Analizde bakım onarım aralığı sıcak asfalt kaplama ve TMA kaplam sırasıyla 7,5-10 yıl alınmıştır. Avrupa’nın araştırmalarını göre TMA kaplamalar geleneksel asfalt kaplamalarını göre %30-40 daha uzun ömürlüdür.

Çizelge 2.9 TMA ile BSK bakım onarım maliyeti (NAPA, 2002)

Kaplama Tipi	Bakım-Onarım Aralıkları	Yıllık maliyet \$
Yoğun Gradasyonlu Sıcak Karışım Asfalt	7.5	79532
Taş Mastik Asfalt	10	50095

Yapılan çalışmaları incelendiğimizde TMA’nın ilk maliyeti yüksek ama uzun ömürlü, yüksek stabilite ve daha az periyotlarda bakım onarım gerektirmesi açısından uzun vadede ekonomik bir kaplamadır (Blazejowski, 2011; NAPA, 2002).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yapılan çalışmada agrega olarak bazalt, modifiye katkı olarak atık polipropilen piroliz işleminden elde edilen katı maddesi ve SBS (Stiren Bütadien Stiren), fiber türü olarak selülozik elyaf (viatop) ve filler olarak da bazalt kullanılmıştır. Materyal ve yöntem kısmında malzemelerin tanımları ve temin edilen yerler ve yapılan deneyler anlatılmaktadır.

3.1. Agrega

Yol kaplama yapımında kullanılan agregalar önemi ve payı en fazla olan malzemelerden biridir. Kaplamada kullanılacak olan agregaların uygunluğu fiziksel ve mineralojik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca esnek kaplamada agrega seçiminde agregaların üretilebilirliği, kalitesi ve maliyeti göz önünde alınır. Yol kaplamalarında kullanılan kırılmış agregaların serim sırasında üzerine gelen değişen yüklerin karşılanması ve dağıtılması, trafik, ısı değişimi, donma çözünme ve diğer iklimsel değişimlere dayanıklı olmalıdır (İzol, 2020; Arslan, 2014).

Boyut olarak agregalar üç grupta incelenir.

- Kaba agrega; 4 nolu elek (4,75 mm) üzerinde kalan
- İnce agrega; 4 nolu elek ile 200 nolu elek (0,075 mm) arasında kalan
- Mineral filler; 200 nolu elekten geçen

Agregadan istenilen görevleri yerine getirebilmesi için, uygun özelliklere sahip agreganın seçimi en önemli husustur. Agregaların üretim sırasında gerekli kalite kontrol işlemleri dikkatlice yapılarak hizmet ömrü boyunca stabil, ekonomik, emniyetli kaplamalar elde edilir. Kaplamanın yapısal ve fonksiyonel gereksinimlerini yerine getirebilmesi için agregaların aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir.

- Kimyasal ve İklimsel etkilerin aşındırmasına karşı dayanıklı olmalı,
- Trafik (statik ve dinamik) yükler altında kırılmalara karşı dayanıklı olmalı,
- İç gerilmelere (genleşme–büzülme, ıslanma–kuruma, donma–çözülme vb.) karşı dirençli olmalı,
- Bağlayıcı ile güçlü adezyon yapmalı,

- Yüzey tabakalarında kullanıldığında; kayma ve sürtünme direnci, tekerlek aşındırması, pürüzlülük, görünüm ve ışık yansıtması, gürültü gibi yüzey özelliklerini sağlamalıdır (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımların tasarımında, agrega gradasyonu, kırılmışlığı, yüzey pürüzlülüğü ve yassılık durumu, stablité, yorulma performansı ve tekerlek izine etkisi çok büyüktür. Bununla beraber kaplamanın direncinin iyi bir niteliğe sahip olması için en önemli faktör agrega olduğu açıktır. Belirttiğimiz bilgiler göz önünde alındığında agregaların bünyesinde zararlı madde bulunmamalı, kenetlenme direnci yüksek, dayanıklı ve sert olmaları istenmektedir (İzol, 2020; Arslan, 2014).

3.1.1. Bazalt Agrega

Bu çalışmada kullandığımız agrega Niğde ilinden AS Beton firmasından temin edilmiştir. Agrega ocağı Şekil 3.1'deki haritada işaretlenmiştir.



Şekil 3.1 Niğde bazalt ocağı

3.2. Bitümlü Bağlayıcı

Esnek üstyapılarda bitümlü bağlayıcı olarak asfalt çimentoları, sıvı petrol asfaltları (katbek asfaltlar), asfalt emülsiyonları ve katranlar kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların görevi agregaları bir arada tutması ve agrega ile yol yüzeyinde bağlantıyı (yapışma) sağlamaktır. Bitümlü bağlayıcılar sıvı, yarı katı ve katı halde bulunmaktadır.

TS EN 12591 standardına göre bitümlü bağlayıcılar içerisinde en çok tercih edilen bitüm bağlayıcı sınıfları B 50/70, B 70/100 ve B 100/150'dir.

Karışım içerisinde küçük hacim tutmasına karşın bitümlü bağlayıcı, dayanıklılık ve bitümlü karışıma viskoelastik özellik kazandırması sebebiyle karışımlarda çok önemli bir rol oynamaktadır. Bitümlü bağlayıcı viskoelastik bir davranış göstermesinden dolayı, yükleme hızını ve sıcaklığı bağlıdır. Sıcak iklim koşullarında ve sürekli yükleme durumunda bitüm viskoz bir sıvı gibi davranırken, soğuk iklim koşullarında veya kısa süreli yük uygulamalarında ise elastik katılar gibi davranış sergilemektedir. Normal iklim koşullarında, bitümlü bağlayıcılar, hem viskoz sıvı ve hem de elastik katı madde özelliklerini gösterecek şekilde davrandıklarından, yol kaplamalarında büyük oranda tercih edilmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların cinsinin ve penetrasyon derecesinin seçilmesinde iki özelliği dikkate almakta fayda vardır.

- Kaplama üzerindeki trafiğin tipi ve hacmi,
- Kaplama uygulandığı bölgenin iklim koşulları dikkate alınarak bitümlü bağlayıcı seçimi.

Trafiğin tipi ve hacmine göre yüksek bir stabilite istendiğinde düşük penetrasyonlu bitüm kullanılmalıdır. Kışın soğuk hüküm sürdüğü bölgelerde yapılan kaplamalarda kaplamanın çatlamaya dayanıklılığı göz önüne alınmaksızın yüksek stabilite değerleri elde etmeye çalışılmamalıdır.

Bitüm sınıfı seçimi; kaplama tabakalarının performansı ile sürüş konforunu arttırmak, bakım ve onarım maliyetlerini azaltmak amacıyla yeni TS EN 12591 standardında yer alan bitüm sınıfları çizelgesine göre yapılmıştır. Kaplamanın yapılacağı bölgenin iklim koşulları dikkate alınarak hazırlanan çizelge 3.1 aşağıda verilmiştir (İzol, 2020; Altan, 2018; Arslan, 2014).

Çizelge 3.1 Bitüm sınıfları ve kullanım yerleri (Altan, 2018)

Bitüm Sınıfı		Bitümün kullanılacağı Yerler
BSK için	Sathi Kaplama için	
B40/60	B70/100	Güney Doğu Anadolu'nun güney bölgeleri ve Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü kesimler
B 50/70	B100/150	Karadeniz, Marmara, İç Anadolu, İç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu'nun Kuzey kesimleri, Doğu Anadolu'nun Batı Kesimleri
B70/100	B100/150	Yukarıda Belirtilen bölgelerin çok soğuk kesimleri ile Doğu Anadolu'nun soğuk ve yüksek kesimleri

3.3. Selülozik Elyaf

TMA karışımlarda bitümün akmasını önlemek için selüloz elyaf veya mineral elyaf kullanılmaktadır. KTSŞ'ye göre karışımda elyaf içeriği karışımın ağırlığının %0,3-1 arasında olmalıdır. Bu çalışmada şekil 3,2'de gösterilmiş olan ve Teknomet tarafından temin edilen VIATOP selülozik elyaf kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Selülozik elyaf görünümü

Karışıma eklenen selülozik VIATOP kaplamanın stabilitesini artırır. Bu tarzda yapılan yollarda (en yoğun trafik altında bile) deformasyona karşı iyi bir direnç ve uzun bir bitüm hizmet ömrü elde edilir. En temel uygulama, TMA'daki kullanımdır. Geleneksel yol kaplamaları ile kıyaslandığında, VIATOP kullanılarak üretilen TMA kaplamalar, son 25 yıl içerisinde Avrupa'nın en çok kullanılan kaplaması olmuştur. Aynı zamanda, bitüm içerisinde tamamıyla çözülüp dağılması beklenen liflerin ayrışmasını ve dağılmasını kolaylaştırır. Selülozik elyaf VIATOP kullanılarak yapılan, ses-azaltan asfalt, sessiz asfalt, ince tabaka asfalt veya binder tabakası kalitesinde ciddi anlamda gelişme ve dolayısıyla yol yapımı maliyetinde daha ekonomik çözüm elde edilmiştir (URL 9, 2013)

Karışımında kullanılan elyaflar KTŞ şartnamesine uygun olmalıdır. KTŞ özellikleri çizelge 3.2 de verilmiştir.

çizelge 3,2 KTŞ'ye göre elyaf özellikleri

Elyaf uzunluk (maks)	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

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

Artan araç sayısı ve trafik yükleri kaplamada farklı bozulmalara sebep olmaktadır bu bozulmaları sınırda tutmak ve daha uzun ömürlü karışımlar elde etmek için modifiye katkı kullanılmaktadır. Günümüzde asfalt yol üstyapı kaplamalarında popüler olan Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) olmak üzere değişik polimer modifiye edici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bitüm ve SBS homojen bir şekilde karışması için SBS'yi öğütterek bitümle karıştıran, mikser denen bir yüksek devirli öğütücü mikser (high shear mixer) tesisi gereklidir. Optimum sıcaklık bitüm ve SBS karışması için 180°C-190°C dir. SBS bitüm ağırlığının %4-5 arasında katılarak uygun bir modifiye bitüm elde edilir. SBS şekil 3.3'te gösterilmiş ve teknik özellikleri çizelge 3.3 verilmiştir (Şanlier, 2018; Arslan, 2014).



Şekil 3.3 SBS veya Kraton görünümü

Çizelge 3.3 SBS teknik özellikleri

Özgöl Ağırlık, gr/cm ³	0,94
Kütle Ağırlık, 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

3.5. Agregada Deneyleri

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

Asfalt kaplamalarda kullanılacak agregaların boyut dağılımını belirlemek için standart kare delikli elekler kullanılmaktadır. Elek çapları aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Deney metodu, agreganın en büyük dane çapı bağlamında bir agregada karışımın standart eleklerden elenmesi sonucu, elekten geçen kısmın tüm miktarına oranının yüzde cinsinden bulunması amacıyla yapılır. Deneyde bir süre eleme işlemi sonucu bulunan gradasyon, sınıflandırmada, gradasyonun şartnameye uygunluğunun kontrolünde ve agregada karışım oranlarının hesabında kullanılır.

Agregada numunesi içindeki tanelerin dağılımına granülometri, bu dağılımı gösteren eğriye de granülometri eğrisi denilmektedir (Kabadayı, 2019; Arslan, 2014).

Çizelge 3.4 Elek açıklıkları ve numune ağırlıkları

Elek Açıklığı		Deney Numunesi Ağırlığı
mm	İnç	min.(kg)
37.5	1 1/2	15
25.0	1	10
19.1	3/4	5
12.7	1/2	2
9.52	3/8	1
4.75	No.4	0,5
2.00	No.10	
0.42	No.40	
0.177	No.80	
0.075	No.200	

- Agregaların maksimum dane boyutuna göre çizelge 3.4'te verildiği gibi verilen miktarda temsili olarak bölgeç ya da dörtleme metodu ile alınır ve 110°±5°C'lik sıcaklıktaki etüvde kurutulur, soğumaya bırakıldıktan sonra tartılır, kütlesi W1 olarak kayda edilir.

- Kurutulmuş numunelerin tartıldıktan sonra 200 nolu elek üstünde yıkama işlemi gerçekleştirir işlem su berraklaşana kadar devam edilir. Yıkanan numuneler $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik etüvde kurutulduktan sonra tartılır ve ağırlık W2 olarak alınır.
- Kurutulmuş ve yıkanmış agregalar %100 geçen elekten başlayarak alt eleklerle ayrı ayrı eleme işlemi gerçekleşir. Şekil 3.4'te elek takımı büyükten küçüğe sıralanmıştır.
- Her elek üzerinde kalan miktarlar tartılır ve elek analizi tablosuna geçirilerek kümülatif ağırlıklar belirlenmiş olur.
- Elek üzerinde kalan yüzde cinsinden hesaplanarak daha sonra yüzde geçen de hesaplanarak tabloya aktarılır.
- Yüzde geçene hesaplandıktan sonra granülometri eğrisi çizerek standart limitlerin içerisindeyse işlem tamamlanır.



Şekil 3.4 Elek takımı

3.5.2. Los Angeles Aşınma Deneyi (TS EN 1097-2:1998)

Asfalt kaplamalar farklı yüklere maruz kalmakta bu yükler beraberinde üst yapıda aşınmalar meydana getirmektedir. Agregalar kaplama tabaklarının iskeletini oluşturduğu için dayanımı tüm karışımı etkilemektedir. İri Agregaların parçalanma direncini belirlemek için Los Angeles Aşınma deneyi kullanılmaktadır. Deney sonucunda darbelenme ve aşındırma etkisiyle agrega danelerinde oluşan aşınma bulunur. Başka bir deyişle darbelenme ve aşınma etkileri sonucunda mineral agreganın standart gradasyonunun bozulmasının ölçümü deneyidir. Bu deney 14 mm elekten

geçen ve 10 mm elek üzerinde kalan 5 kg agrega üzerinde uygulanmıştır. Los Angeles deney aleti T(amburu) iki ucu kapalı olur iki ucu iki destekle etrafında rahat bir şekilde standarda göre dönmelidir. Tamburun iç çapı (711 ± 5) mm ve iç uzunluğu (508 ± 5) mm olmalıdır Belirlenen numunenin aşındırma yükü yani kaç çelik bilye kullanılması gerektiği aşağıdaki gibidir.

- 4-8 mm olan agrega elek açıklıklar için 8 adet bilye.
- 6,3-10 mm olan agrega elek açıklıklar için 9 adet bilye
- 8 - 12 mm olan agrega elek açıklığı için 10 adet bilye
- 11,2 - 16 mm olan agrega elek açıklığı için 11 adet bilye

Bilyeler 45 ile 49 mm arasında çapa sahip, 11 adet küresel çelik bilyeden oluşan; her bilye, 400 ile 445 g ağırlığı sahip ve toplam ağırlık 4690 ile 4860 g arasındadır. Deneye başlamadan önce cihazın temiz olması özen göstermelidir.

Deneye başlamak için;

- Deney yapılacak stoktan 5000gr numune alınarak yıkanır.
- Yıkanan numuneler etüvde sabit hacim elde edilene kadar kurutulmalı genelde 110°C 24 saat etüvde bekletilir.
- Kurutulmuş numune (5000gr) 11 adet küresel çelik bilye (her biri 45 ile 49 mm arasında çapa, 400 ilâ 445 g ağırlığı sahip) tambura yerleştirilir.
- Tamburun kapağı iyice kapatılarak dakika da 31-33 devir sabit bir hızla 500 devir döndürülür.
- Deney sonunda aşınan agregalar 1,6mm elekten elenir.

1,6mm elek üzerindeki agregalar tartılır ve aşağıdaki formül ile Los Angeles katsayısı hesaplanır (İzol, 2020; Kabadayı, 2019; Altan, 2018; Arslan, 2014; TS 1097-2, 1998).

$$\text{Los Angeles Katsayısı (\%)} = \frac{5000 - m}{5000} \quad (3.1)$$

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

İri agregaların parçalanmaya karşı direnci, LA beyan olarak temsil edilir ve sonuç en yakın tam sayıya yuvarlatılarak verilir (örneğin, TMA karışımlarda kullanılacak agregaların Los Angeles katsayısının ≤ 25 olması istenir. LA25 (beyan değeri)'e karşılık gelir).

Taş masik asfalt karışımlarda $LA \leq 25$ istenmektedir. Şekil 3.5'te Los Angeles deney aleti gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Los Angeles makinesi

3.5.3. Agrega Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyi (TS EN 1097-6)

Bu deney agreganın özgül ağırlığı ve su emme oranını belirlemek amacıyla yapılan bir Deney. TS EN 1097-6 ve ASTM C 127 standardına göre yapılmıştır. Özgöl ağırlık; birim hacim ağırlığının aynı hacimde ve 25°C deki suyun ağırlığına oranıdır. Absorbsiyon (su emme), kuru agreganın içerdiği su emme miktarını belirlemek için yapılan bir deneydir.

İri agreganın Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyi;

Bu çalışmada incelenen üç ayrı tip kaba agreganın özgül ağırlıkları tel sepet yardım ile tayin edilmiştir.

- Agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75mm üstünde kalan agregadan 2 kg numune tartılır ve 24 saate su da bekletilir.
- Numuneler sudan çıkartılıp bir havlu yardımıyla yüzey kuru suya doygün haline getirilir. Yüzey kuru, duygun hale gelmiş numuneler tartılıp (B) kaydedilir.

- Daha sonra agrega numuneler tel sepet içine yerleştirip su dolu kovaya daldırılır su seviyesi numunelerin üzerinde 5cm olacak şekilde Arşimet terazisi (Şekil 3.6) yardımıyla ağırlığı belirlenir (C).



Şekil 3.6 Arşimet terazisi

- Numuneler tel sepetten bir tepsiye boşaltarak 24 saat 110°C sıcaklığında etüvde bekletilir, etüvden çıkarılan numuneler 1-3 saat oda sıcaklığında bekletilip ağırlığı alınır (A). Özgül ağırlık ve su emme oranları aşağıdaki bağıntılar yardım ile hesaplanır (İzol, 2020; Altan, 2018; TS 1097-2, 1998).

$$\text{Kaba agrega hacim özgül ağırlığı (g/cm}^3\text{)} = \frac{A}{B-C} \quad (3.2)$$

$$\text{Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{A}{A-B} \quad (3.3)$$

$$\text{Kaba agrega su emme oranı (\%)} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (3.4)$$

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

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

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

İnce agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi

Bu deney 4 nolu elekten geçen ve 200 nolu elek üstünde kalan agregaların özgül ağırlığı ve su absorpsiyonunu bulmak için piknometre kullanılır.

Deneyde;

- Karışımı temsil edilecek bir şekilde 4,75-0,075mm arasında kalan agregalardan 1000g numune alınır.
- Tartılan numunelerde tepsiye yerleştirip üzerinden su geçecek şekilde 24 saat su içinde bekletilir.
- 24 saatten sonra agrega kaybı olmadan suyu süzülüp, numuneler havlu veya sıcak hava kaynağı ile yüzey kuru suya doymun hale getirilir. Bu halde tartım yapılır ve yüzey kuru suya doymun agrega ağırlığı elde edilir.
- Yüzey kuru hale getirip getirmediğini kontrol etmek amacıyla Abraham Hunisi şekil 3.7’de gösterildiği gibi kontrol sağlanır.
- Yüzey kuru suya doymun numuneden 500g alınarak daha önce boş ağırlığı tartılan (A) Piknometreye yerleştirilir. Piknometre ve yüzey kuru suya doymun numunenin tartımı yapılır (C).
- Daha sonra numune üzerine su ilave edilir ve boşluk kalmayacak şekilde piknometre sarsılır. Piknometre 25°C su banyosuna konulur. Piknometre içerisinde bulunan malzeme 25°C’ ye ulaştığı zaman su banyosundan çıkarılır ve kurularak tartım işlemi gerçekleştirilir (D).
- Ardından piknometrenin içindeki numuneler tepsiye boşaltılarak 110°C etüvde kurutulur. Değişmez ağırlığı ulaştığında ağırlığı belirlenir (E).
- Aşağıdaki denklemler ile agreganın özgül ağırlığı, zahiri özgül ağırlığı ve su emme oranı belirlenir (TS 1097-2, 1998)

$$\text{İnce agreganın hacim özgül ağırlığı} = \frac{E}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.5)$$

$$\text{İnce agreganın zahiri özgül ağırlık} = \frac{E}{B+E-D} \quad (3.6)$$

$$\text{İnce agreganın su emme oranı (\%)} = \frac{C-A-E}{E} \quad (3.7)$$

Piknometre ağırlığı (A)

Piknometre + Suyun ağırlığı (B)

Piknometre + Yüzey kuru ve suya doygün olan numune ağırlığı (C)

Piknometre + Yüzey kuru ve suya doygün olan numune + suyun ağırlığı (D)

Kuru numunenin ağırlığı (E)



Şekil 3.7 Abraham hunisi

Mineral Filler Özgül Ağırlık Tayini

Mineral filler agregaların (0,075 elek altı) özgül ağırlığını tayin etmek için yapılır. Filler agregası için sadece zahiri (görünen) özgül ağırlık hesaplanır.

Zahiri özgül ağırlık; belirli sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır.

- Píknometre şişesi boş halde tartılır (A)
- Píknometre şişesi ağzına kadar su ile doldurulur ve $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklıkta en az 60 dakika su banyosunda bekletilir. Sonra su banyosundan çıkarılan şişe iyice kurulanarak ağırlığı belirlenir (B).
- Filler, $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 4 saat kurutulur. Etüvden çıkartılarak oda sıcaklığında soğutulur. Bir huni yardımıyla kuru ve temiz olan píknometre şişesinin üçte biri dolacak şekilde filler şişeye boşaltılır ve şişe kapatılarak tartılır (C).
- Son olarak şişe ağzına kadar su ile doldurularak $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'lik su banyosunda en az 60 dakika bekletildikten sonra kapağı kapatılarak su banyosundan çıkartılır, kurulanır ve tartılır (D)

Aşağıdaki formül ile Mineral agreganın özgül ağırlığı belirlenir (TS 1097-2, 1998).



Şekil 3.8 Píknometre şişesi

$$\text{Mineral Fillerin Zahiri Özgül Ağırlığı} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.8)$$

Burada;

- A: Boş Piknometre ağırlığı, (g).
 B: su dolu piknometre ağırlığı, (g).
 C: Piknometre +kuru numune ağırlığı, (g).
 D: numune + su dolu piknometre ağırlığı, (g).

3.5.4. Yassılık İndeksi Deneyi

Bu deneyin amacı yassı agregada danelerinin deneyde kullanılan toplam agregada ağırlığına oranını belirlemektir. Deney en küçük boyutu en büyük nominal boyutun 0.6'sinden daha küçük olan agregaların yassı olarak sınıflandırması esasına dayanır. Bu deney; 4mm elek altı kalan ve 80mm elek üzerinde kalan agregalarda uygulanmaz.

Yassılık indeksi tayininde belirli boyuta sahip şablondan (Şekil 3.9) veya silindirik çabuk eleklerden kullanılmakta deney sonunda yassı danelerin ağırlığının, ilk numune ağırlığına oranının yüzdesi olarak tayin edilir. Yassılık indeksi agregaların dane şekli tayininde referans deney olarak kullanılmalıdır. Karışımda Yassı agregada oranı fazla olursa yolun özelliklerini düşürmesini sebep oluyor (Arslan, 2014).



Şekil 3.9 yassılık indeksi şablonu.

- Yassılık indeksini belirlemek için önce elek analizi yapılır, yapılan elek analizi sonucuna göre malzeme miktarı 63 -50 mm elekten geçip 9,5 – 6,3 mm açıklıklı

elekler üzerinde kalacak şekilde ayarlanır. Çizelge 3.5'te istenilen agreganın boyutuna karşılık gelen miktardan numune alınarak tartılır.

- Yassılık indeksi şablonundan agregalar el ile teker teker yassılık indeksi şablonunun ilgili boşluğundan geçirilir.
- Her elek di-Di arasında kalan agreganın için geçen miktarları tespit edilip, her aralık için ayrı ayrı yassılık indeksi hesaplanabilir.
- İstenirse elekten geçen agreganın miktarları toplanıp, toplam agreganın miktarına oranlanarak kümülatif yassılık indeksi hesaplanabilir.

Çizelge 3.5 İstenilen agreganın boyutuna karşılık gelen agreganın miktarı

Elek Açıklığı		Her Fraksiyon İçin Deneye Alınacak Minimum Malzeme Miktarı (kg)
di/Di mm	inç	
50-63	2 ½ - 2	25
37.5 – 50	2 – 1 ½	18
25 – 37.5	1 ½ - 1	8
19 – 25	1 – ¾	2,5
12.5 – 19	¾ - ½	1
9.5 – 12.5	½ - 3/8	0,5
6.3 – 9.5	3/8 – ¼	0,25

Aşağıdaki formül ile yassı dane yüzdesini hesaplanabilir. Fraksiyonlara ait yassı dane yüzdelерinin toplamı, malzemenin yassılık indeksini verir (TS 1097-2, 1998).

$$Yassı Dane Yüzdesi = \frac{M2 * 100}{M1} \quad (3.9)$$

M1: Deneye alınan malzeme ağırlığı, (g),

M2: Deneyde bulunan yassı malzeme ağırlığı, (g)

3.6. Bitüm Deneyleri

3.6.1. Özgül Ağırlık Deneyi (TS EN 15326 – ASTM D70)

Bir bağlayıcının özgül ağırlığını belirlemek amacıyla, piknometre yöntemi kullanılır. Bağlayıcı maddenin belirli sıcaklıkta (25°C) havadaki ağırlığının havası alınmış aynı hacimli destile suyun ağırlığına oranıdır. Deneyde;

- Piknometre temiz iken boş ağırlığı tartılır (A).
- Piknometre su ile doldurulur, kapağı kapatılır ve tekrar tartılır (B).
- Piknometre içerisinde bağlayıcı konulur (yaklaşık olarak piknometrenin 2/3 kadar) ve tartılır (C).

- Piknometre su ile doldurulur, kapağı kapatılır 25°C sıcaklıkta su banyosunda 30 dakika bekletilir ardından yüzeyi kurulanır ve tartılır (D).

Bitüm özgül ağırlığı aşağıdaki bağlantı yardım ile hesaplanır.

$$\text{Bitüm Özgül ağırlık} = \frac{(B-A) - (D-C)}{(C-A)} \quad (3.10)$$

Boş Piknometre ağırlığı (A)

Su ile dolu Piknometre ağırlığı (B)

Bitüm ile Piknometre ağırlığı (C)

Piknometrenin + bitüm + su ağırlığı (D)

3.6.2. Penetrasyon Deneyi (TS EN 1426)

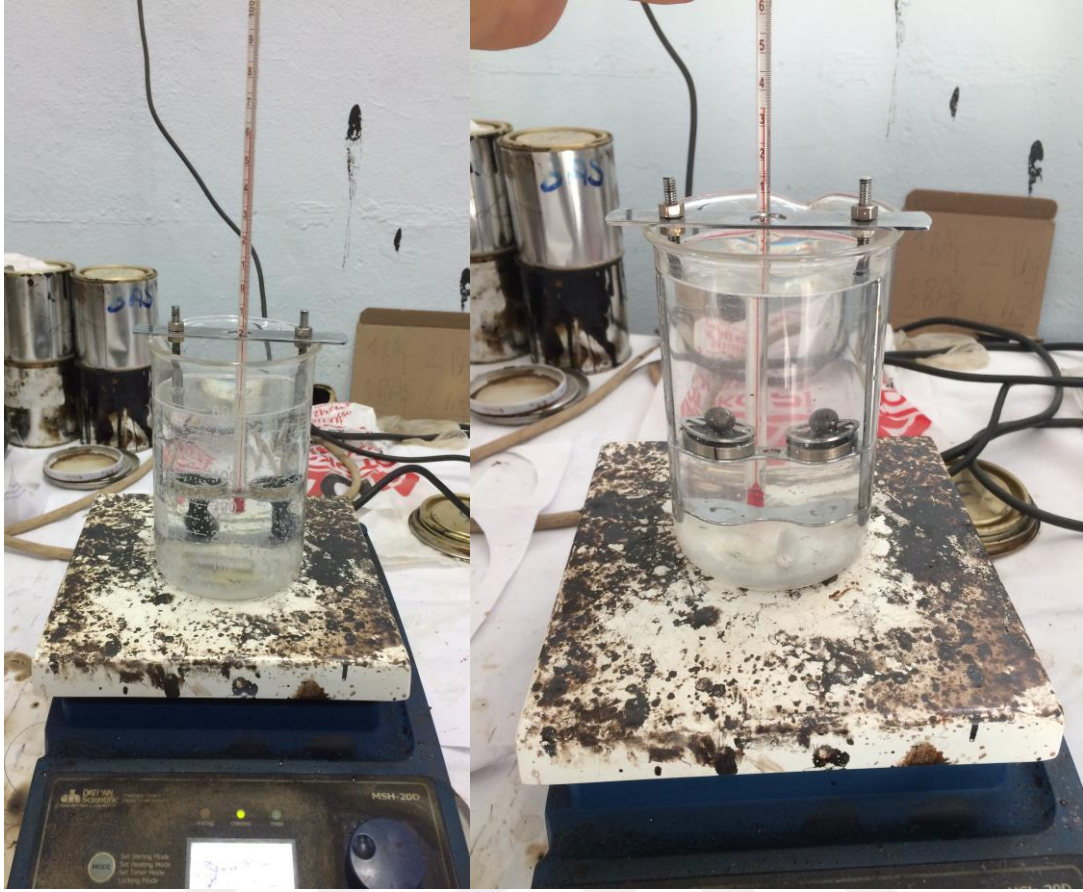
Penetrasyon; batma veya içe girme demektir. Bitümlü bağlayıcının kıvamlılığı veya sertliği ölçmek içindir. Bu deneyde Standart bir iğnenin belirli yük altında (100gr) belirli bir süre (5 sn) 25°C sıcaklıkta düşey doğrultuda battığı mesafe 0,1 mm cinsinden hesaplanır. Penetrasyon değeri ile kıvamlılık arasında ters ilişki vardır. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak daha akışkan bir bitüm söz konusudur. Kıvamlılık artıkça penetrasyon derecesi azalır. Deney sonunda okunan değer 100 ise penetrasyon derecesi 100 demektir, yani iğne asfalt içerisinde 1cm girmiştir demektir (TS EN 1426, 2008; ESOĞÜ, 2020). Şekil 3.10’de penetrasyon deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Penetrasyon deney cihazı

3.6.3. Yumuşama Noktası Deneyi (TS EN 1427)

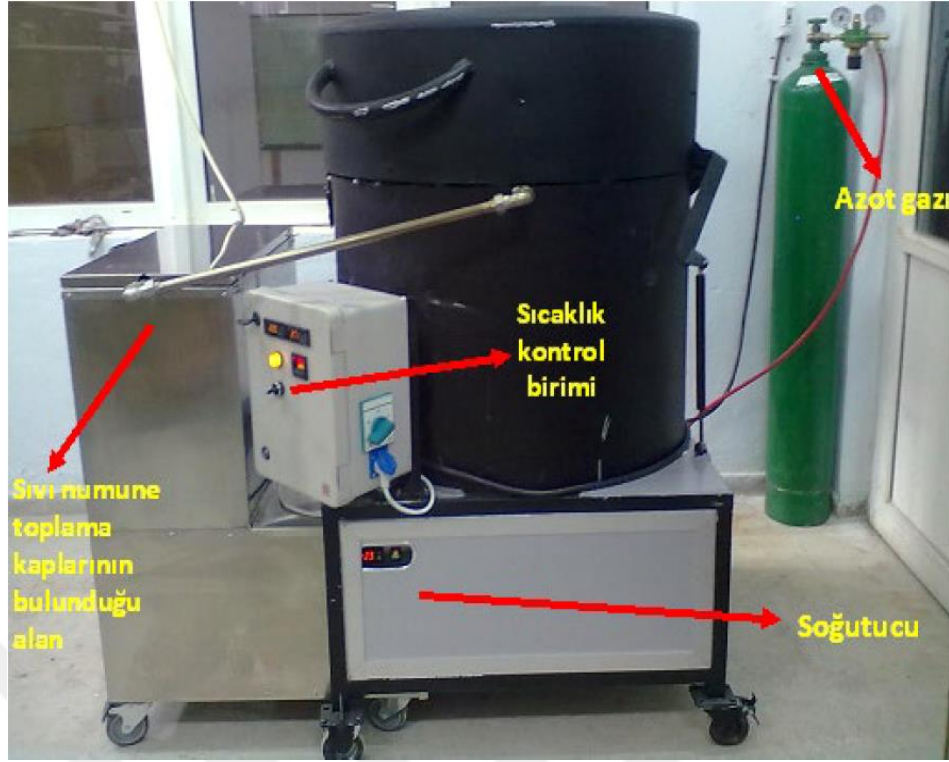
Bu deney bitümün sıcaklık karşısındaki davranışını, kıvamlılığını belirlemek için (bitümün hangi sıcaklıkta akmaya başladığı) yüzük bilye yöntemi kullanılarak yumuşama noktası olarak ifade edilen sıcaklık belirlenir. Bitümün yumuşama noktası ile viskozite değeri doğru orantılıdır. Yüksek Yumuşama noktaya sahip bitümlerin, viskozitesi de yüksek olduğundan, sıcak karışım yapım sıcaklıkları da yüksek olmaktadır. Deney yapmak için ilk önce deney düzeneği halka, bilye, termometre ve balık karıştırıcı ayarlanır. İlk olarak deneyde kullanılan bitüm ısıtılır. Daha sonra halkalar yağlanıp halka içeresinden bitüm taşmayacak şekilde dökülür. Oda sıcaklığında yaklaşık 30 dakika bekletilir. Baştaki deney sıcaklığı 5°C olacak şekilde içi su dolu cam beher ayarlanır. numuneler, bilye ve termometre sabitleme aparat düzeneğine takılarak cam beherin içeresine yerleştirilir. Cam beher ısıtıcı üzerinde konularak ısıtıcı 5°C artacak şekilde ayarlanır. Deney halkaları içerisindeki bitümün numune, bilyelerle beraber aşağıya sarkan kısmı aparat taban yüzeyine değdiği anda termometreden okunan sıcaklık değeri yumuşama noktası değeridir. Aşağıda Şekil 3.11’de deney aparatı gösterilmiştir (TS EN 1427, 2002; (ESOGÜ, 2020).



Şekil 3.11 Yumuşama noktası deney aparatları

3.7. Piroliz Deney Sistemi

Polipropilen atıkların piroliz işlemi aşağıdaki Şekil 3.12’de gösterilen deney sisteminde yapılmıştır. Deney sistemi 3 farklı birimden; fırın, kontrol ve yoğunlaştırma (soğutucu ve sıvı ürün toplama kısmı) ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 3.12 piroliz deney makinesi ve birimleri (AKMAZ, 2020)

Piroliz işleminin ilk aşaması olarak; yüksekliği yaklaşık 30 cm ve iç çapı 10 cm olan çelik bir reaktör (Şekil 3.13.a) içerisine deney için hazırlanmış numune koyulur ve reaktör dikey olarak deney cihazının fırın birimine yerleştirilir. Piroliz işleminin olduğu birim iç kısmında, yüksek sıcaklığa dayanabilen ve ısıyı reaktöre aktaran direnç telleri mevcuttur (Şekil 3.13.b). Ayrıca, fırın çıkış borusu (deney sırasında bozulan ürünün reaktörden çıktığı, Şekil 3.13.a’da sol taraftaki boru), sıvı kaplarını tutan boru ve bu iki borunun bağlantı borusundan oluşmaktadır. Bu boruların kalınlıkları artırılmış ve ilk başta Şekil 3.12’deki gibi olan “piroliz deney cihazı”, sonraki aşamalarda modifiye edilmiştir (Şekil 3.13.c). Şekil 3.13.c’de görüldüğü gibi; ürün akışını kolaylaştırmak ve tıkanmaları önlemek amacıyla, kalınlaştırılan boru eğimli bir şekilde tasarlanmış ve üzerine ısıtma sistemleri eklenmiştir.



Şekil 3.13 Piroliz deney sistemin ekipmanları.

Piroliz deney düzeneğinin kontrol biriminde, açma–kapama düğmesi ve ısıtma hızının ayarlanmasını sağlayan düğmeler mevcuttur. Reaktörden gelen fırın çıkış borusu, bağlantı borusu ve sıvı ürün toplama kaplarını tutan boru yardımıyla reaktör içinde bozulan ürünün akışı sağlanmaktadır. Soğutucu sistemine gelen bu ürün, yoğunlaştırma biriminde sıvı ürüne dönüşmektedir. Sıvı ürün yakalama kaplarının (Şekil 3.13.e) soğutucu içerisine (Şekil 3.13.d) dikey olarak yerleştirilmesiyle, piroliz sürecinde akış halindeki ürünler yoğunlaştırılarak sıvı ürün olarak bu kaplarda toplanmaktadır. Yoğunlaştırılamayan ürünler, sıvı ürün yakalama kaplarını tutan boru ve ona bağlanan hortum yardımıyla gaz ürün olarak dışarıya salınmaktadır. Ayrıca, piroliz işlemi için gerekli olan N_2 (Azot) gazı akışını sağlamak amacıyla, reaktörün diğer kısmına (Şekil 3.13.a’da sağ taraftaki boru) N_2 gazı bağlanmaktadır.

Piroliz deney düzeneğinin çalışma sistemi incelendiğinde; piroliz işlemi için belli bir sıcaklık ayarlaması yapıldığında, ısıtmanın bu sıcaklıkta durduğu fakat sistemin sıcaklığının yükselmeye devam ettiği görülmektedir. Bunun sebebi şudur: Deney için gerekli hazırlıkların yapılıp cihazın çalıştırılmasıyla, reaktör ayarlanan ısıtma hızı ve sıcaklığa göre sistem tarafından ısıtılmaktadır. Ayarlanan sıcaklığa ulaşıncaya, sistem

ısıtmayı kesmekte fakat fırın içinde reaktöre ısıyı aktaran sistem olan direnç tellerinde biriken enerji sonlanamamaktadır. Yalıtımın iyi olması ve sistemin hava almamasından dolayı, fırın içinde biriken enerji ile reaktör ısınmaya devam etmektedir. Yani, sistemin ataletiyle, ayarlanan sıcaklığa geldikten sonra da sıcaklık yükselişi devam etmekte ve piroliz reaksiyonu sürmektedir. Buradan hareketle, yapılan deneylerde sıcaklığın belli bir değere kadar (son sıcaklık) yükseldiği ve bu sıcaklıkta belli süre kaldıktan sonra düştüğü görülmüştür. Sistemin tamamen ısınmasının bittiği, soğumaya geçtiği ve piroliz sıcaklığının bu son sıcaklık olduğu düşüncesiyle, bu andan itibaren cihaz kapatılmış ve deney sonlandırılmıştır (Akmaz, 2020).

3.8. Modifiye bitüm üretimi

Bitümlü bağlayıcılar ile farklı kimyasal bileşiklerin birbirleriyle olan karmaşık ilişkilerini tam olarak bilmek çok zordur. Aynı kuyudan çıkarılan ham petrol aynı rafineride üretilmiş olsa bile farklı davranış gösterebilmektedir. Dolayısıyla bitüm karmaşık bir yapıya sahiptir ve istenilen özellikleri kontrol altında alınmamaktadır. Bu istenilen özellikleri kontrol altına almak ve iyileştirmek için bazı katkıları kullanılmaktadır. Budan dolayı modifiye bitümler son yıllarda hızlı bir şekilde kullanmaya başlamıştır (Tunç, 2004).

TMA'da kullanılan bitüm rafineride, plentte veya özel istasyonlarda modifiye edilebilir. Bazen sıcak karışım plenti içine modifiye katkı ekleyerek de karışım iyileştirilebilir. Modifiye bitüm elde etmek için kullanılacak polimerler erime noktasının üzerinde bir sıcaklıkta bitüm ile tamamen karışımını sağlayacak uygun karıştırıcı ile homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilir. İstenilen sıcaklığa kadar bitüm ısıtılarak, içerisine katkı malzemesi belirlenen oranda eklenerek, karıştırılır ve genellikle bu karışım bir değirmenden (karıştırıcıdan) geçirilerek fazların homojen bir şekilde karışması ile modifiye bitüm elde edilir.

Aşınma tabakası trafik yüklerinin ve çevre şartlarının olumsuz etkilerine doğrudan temas halindedir. Üstyapının ömrünün uzatılması açısından kaplama tabakasında bağlayıcı olarak kullanılan bitümün bileşiminin ısı değişikliklere, havaya, neme, güneş ışığına (oksidasyona) karşı dayanımının yüksek olması önemlidir.

Modifiye edici katkının ana rollerinden birisi de karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, bitüm veya karışımın özelliklerini olumsuz etkilemeyecek şekilde artırmaktır. Bu işlem karışımın toplam visko elastik tepkisini

azaltmak ve bunun beraberinde kalıcı şekil değiştirmede azalma yaratmak amacıyla bitümün sertleşmesi ya da yine kalıcı şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün elastik bileşenini artırarak viskoz bileşeni azaltmak yoluyla gerçekleştirilmektedir (Whiteoak, 2004).

Modifiye edici katkının etkili olabilmesi ve hem pratik hem de ekonomik uygulaması için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır.

- Kolayca bulunabilir ve ekonomik olması
- Bitümle karıştırma sıcaklıklarında bozulmaması
- Bitüm ile karışabilmesi
- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitümü fazla viskoz, sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında ise çok rijit veya kırılgan hale gelmemesi (Whiteoak, 2004).

İlcalı ve ark. (2001) karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilginin artmasında etkili olan bazı hususları şöyle sıralamışlardır.

- Ham petrol ve bitüm fiyatlarında her zaman artış tehlikesi olabilir.
- Yüksek maliyetler daha ince kaplamaların inşası eğilimini doğurmuş ve bu durumda da hizmet ömrü kısa olduğu belirlenmiştir.
- Trafik yüklerinde önemli derecede artış görülmüştür.
- Kaynak sıkıntıları sebebiyle gerekli onarımların zamanında yapılmaması durumuyla oldukça sık rastlanmıştır.
- Bazı endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi veya başka bir yere nakledilmesi konusunda oluşan çevreci ve ekonomik baskılar sonucu bu atıkların bitüm katkı maddesi olarak kullanılması düşüncesi ortaya çıkmıştır.
- İnşaat ekipmanlarındaki gelişme, katkı kullanılması olanağını sağlayacak düzeye ulaşmıştır.

Bunun gibi sebeplerden dolayı, dünyada modifiye bitüme olan ilgi artmıştır. Modifikasyon işlemi iki tür yapılmaktadır. Bitüm içine katkı maddesi katılarak “modifiye bitüm” veya asfalt plentinde karışıma katılarak modifiye karışım elde edilir. Bu çalışmada bitüm içine katkı maddesi ekleyerek bitüm modifikasyonu gerçekleştirilmiştir (İlcalı, ve ark, 2001). Modifiye cihazı şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Modifiye bitüm makinesi

3.9. Marshall Tasarım Yöntemi (TS 12697-30)

Bitümlü sıcak karışımların tasarımında Marshall metodu yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metot ilk olarak bitüm mühendisi Bruce Marshall (ABD Mississippi Eyalet Otoyolları Departmanı) tarafından 1940 yıllarda geliştirmeye başlamıştır. İlk ABD’de uçak pistleri test edilmeye başlamış, detaylı araştırmalar ve çalışmalar sonucunda Marshall yöntemi oluşturulmuştur. Bu yöntem gerekli oranda bitüm miktarını belirleyerek, sağlam (durabil) bir üst yapı oluşturmak, sıkıştırılmış olan

karışımında belirli bir boşluk (hava ve nem bulundurmayacak) sağlayarak trafik yüklerinin etkisiyle oluşabilecek kuma ve akma gibi durumların önüne geçmek için uygulanmaktadır. Burada, ayrışma meydana gelmeden uygun işlenebilirliğe sahip asfalt beton serimi gerçekleştirmek, asfalt tabakasında meydana gelebilecek deformasyonlara karşı dayanım oluşturmak ve ekonomik olarak en uygun karışımı belirlemek amaçtır (Kabadayı, 2019; Alp, 2018).

KTŞ'ye göre TMA karışımların tasarım kriterleri aşağıda Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 TMA dizayn kriterleri (KGM, 2013)

Özellikler	TMA aşınma şartname limitleri	Deney standardı
Darbe sayısı	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları (%)	2-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları	3-4	
TİP 1 için Agregalar Arası Boşluk (VMA) % min.	16	TS EN 12697-8
Tekerlek İzinde Oturma (30 000 devirde 60 °C' de) % maks.	6	TS EN 12697-22
Elyaf Miktarı (%)	0,3-0,1	
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.	0.3	TS EN 12697-18

Marshall tasarım aşamaları aşağıdaki gibidir;

- Gradasyonu belirlenmiş 0,075mm ve 25mm arasında değişen 1150gr agregası hazırlanarak, karışım sıcaklığına erişecek (180°C) şekilde etüvde bırakılır.
- Bitümlü bağlayıcı ısıtılır.
- Bitüm ile agregası mekanik bir karıştırıcı veya elle karıştırılır.
- Beklenen optimum düzeydeki bitüm oranında, her bitüm yüzdesi için en az 3 briket (101,6 mm çapında, 64 mm yüksekliğinde silindirik numuneler) hazırlamak için kalıpların hazırlanması (temiz olması ve alt üst kağıt konulması)
- Hazırlanan karışımlar kalıplara koyulur.
- TMA briketleri 2x50 darbe sayısı ile sıkıştırılır
- Numuneler soğuduktan sonra kalıplardan çıkarılarak oda sıcaklığında bir gün bekletilir.
- Hazırlanan silindirik numuneler (Marshall briketleri) yükseklikleri 3 farklı yerden ölçülür ve daha sonra da havada (A), suda (C) ve doygun-yüzey (B) ağırlıklarının tartılması ve hacim özgül ağırlıklarının, boşluk oranlarının ve asfaltla dolu boşluk oranlarının hesabı

- Marshall briketlerin stabilite ve akma deneylerini tabi tutulması için 60 °c sıcaklıkta su banyosunda yaklaşık olarak 30-40 dakika bekletilir
- Marshall briketleri üzerinde belirli şartlar altında yüklemeler yapılarak maksimum stabilite ve buna karşılık gelen akma miktarı hesaplanır. Akma; yüklemeden dolayı düşey yönde oluşan deformasyon olarak tanımlanır (İzol, 2020; Alp, 2018; Arslan, 2010).

Marshall deneyinin yapılış aşamaları Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



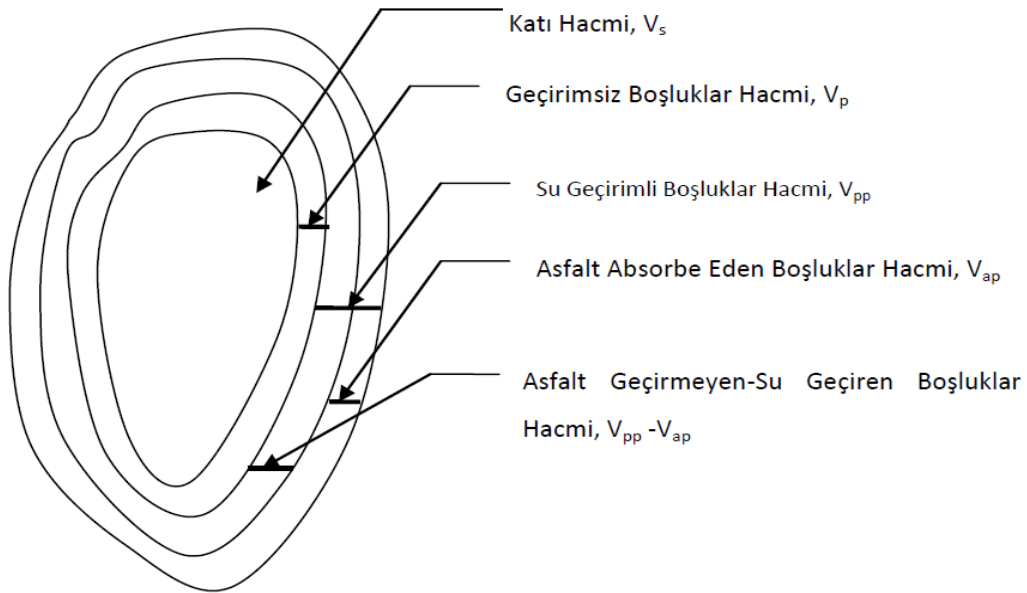
Şekil 3.15 Marshall deney aşamaları

Optimum bitüm miktarını bulmak için gerekli olan formüller;

Yapılan deneylerin sonuçlarını hesaplayabilmek için ilk olarak agregaların özgül ağırlık değerlerinin bilinmesi gerekir. Özgül ağırlık, agreganın birim hacimdeki ağırlığının aynı hacimde ve 25°C deki suyun ağırlığına oranıdır. Agregalar tane hacim tanımını göre üç tür özgül ağırlık mevcuttur. Bunlar;

1. Zahiri Özgül ağırlık
2. Hacim özgül ağırlık
3. Efektif özgül ağırlık

Bunların arasındaki ilişkiye anlamak için Şekil 3.16'da agrega danesinin hacim tanımları verilmiştir.



Şekil 3.16 Agrega danesinin farklı özgül ağırlıkları arasındaki ilişki (Arslan, 2014)

Zahiri özgül ağırlık; asfaltın, su geçirimli tüm boşlukları tarafından absorbe edildiği kabul edilir ve bu şekilde hesaplanır: $= (V_s / (V_s + V_p))$.

Hacim özgül ağırlık; geçirimli ve geçirimsiz tüm boşluklarla beraber katı dane hacmini de kapsar ve bu şekilde hesaplanır $(V_s / (V_s + V_p + V_{pp}))$.

Efektif özgül ağırlık; bitüm absorbe eden boşluklar dışındaki tüm hacmi kapsar ve bu şekilde hesaplanır $(V_s / (V_s + V_p + V_{pp} - V_{ap}))$.

V_s , V_p , V_{pp} 'nin ne anlamda geldiğini Şekil 3.16'da açıklanmıştır.

Eğer Zahiri özgül ağırlık kullanırsa, bitümün su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgül ağırlık kullanılırsa, bitümün su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgül ağırlık

kavramı sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki boşluk hesabı için en doğru sonucunu verir. Çünkü bu kavram agregata tarafından absorbe edilen bitüm miktarını dikkate almaktadır (İzol, 2020; Arslan, 2014).

Agregaların özgül ağırlıkları aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$\text{Agreganın hacim özgül ağırlığı (G}_{sb}) = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%İ}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (3.11)$$

$$\text{Agreganın zahiri özgül ağırlığı (G}_{sa}) = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%İ}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (3.12)$$

Burada;

G_{sb} = karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{sa} = Karışımının zahiri özgül ağırlığı

Burada % K, % İ, % F ; Sırasıyla kaba, ince ve filler agregaların ağırlıkça yüzdeleri

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

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

$$\text{Agreganın efektif özgül ağırlığı (G}_{ef}) = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3.13)$$

W_a: Agregata ağırlığının yüzdesi olarak bitüm

D_T: Maksimum teorik özgül ağırlık

G_b: Bitüm özgül ağırlığı

Teorik maksimum karışım yoğunluğu (D_T) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$D_T = \frac{100 + W_{asf}}{\frac{100}{SG_{ef}} + \frac{W_{asf}}{G_{asf}}} \quad (3.14)$$

D_T = Teorik maksimum özgül ağırlığı

W_{asf} = bitüm ağırlığının yüzde olarak

G_{ef} = Agregata efektif özgül ağırlığı

G_{asf} = Bitümün özgül ağırlığı

Bitüm absorpsiyonu;

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{ef}} * G_b \quad (3.15)$$

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

G_{sb} = Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Agrega tarafından absorbe edilen suyun hacmi, absorbe edilen bitüm bağlayıcı hacminden daha fazladır. Bundan dolayı agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır (İzol, 2020).

Karışımın Efektif Bitüm Yüzdesi;

Karışımın Efektif Bitüm Yüzdesi (P_{be}) = $W_a - P_{ba}$

W_a = Agreganın ağırlıkça ifadesi olarak bitüm

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

Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki VMA Yüzdesi:

VMA mineral agregalar arası boşluk yüzdesi olup, efektif bitüm hacmi ile hava boşluğu içeren sıkıştırılmış kaplama karışımının agregat daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır.

$$\text{Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA)} = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} * \frac{100}{100 + W_a} * 100 \quad (3.16)$$

D_p = Sıkıştırılmış kaplama karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{sb} = Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı

W_a = Agreganın yüzdesi olarak bitüm

Karışımın Hava Boşluğu ve Asfaltla Doluluk Yüzdesi;

$$\text{Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu (Vh)} = \frac{D_t - D_p}{D_t} * 100 \quad (3.17)$$

$$\text{Bitümle dolu boşluk (Vfb)} = \frac{VMA - Vh}{VMA} * 100 \quad (3.18)$$

D_T = karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı

Marshall deneye göre briketlerin yükseklikleri, her bitüm yüzdesi için briketlerin ortalama yükseklikleri alınır, Dp'ler (pratik yoğunluk) hesaplandıktan sonra, Dt (teorik özgül ağırlık), Vh (hava boşluğu), VMA (agregalar arası boşluk), Vf (asfaltla dolu boşluk), briket yüksekliğine göre düzeltilmiş stabilite ve ortalama stabilite ve akma değerleri hesaplanır. Aşağıdaki grafikler çizilir (Orhan, 2012).

- Dp -Wa
- Stabilite -Wa
- Vf -Wa
- Vh-Wa
- Akma -Wa
- VMA -Wa

En yüksek stabiliteye karşılık gelen bitüm miktarı, en yüksek Dp'ye karşılık gelen bitüm miktarı, Vfb grafiği şartname ortalama değerden indirilen dikmeye karşılık gelen bitüm miktarı ile Vh grafiği şartname ortalama değerden indirilen dikmeye karşılık gelen bitüm miktarı ortalamaları alınarak, dizayn optimum bitüm değeri bulunur.

$$\text{Optimum bitüm \%} = \frac{\text{Dp için Wa} + \text{Vf için Wa} + \text{Vh için Wa} + \text{Stabilite için Wa}}{4} \quad (3.20)$$

Başka dikkat edilmesi gereken konu uygulanacak bölgenin iklim koşulları dikkate alınarak bulundurularak bitüm miktarı belirlenir. Soğuk olduğu bölgelerde, durabilite ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanıklı bir tabaka oluşturmak için bitümü daha zengin fakat kuma meydana getirmeyecek karışımlar, sıcak bölgeler için plastik deformasyonu azaltacak ancak yeterli durabiliteyi sağlayacak karışımlar oluşturulmalıdır (Orhan, 2012).

Marshall oranı (stabilite / akma) deneyi;

Karışımların stabilite / akma değeri Marshall oranı olarak bilinmektedir. Karışım rijitliğinin ve asfalt betonun deformasyona karşı direncin bir ölçüsü olmaktadır. Deneyden elde edilen oran değerler, briketlerin deformasyon dirençlerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu oranların yüksek çıkması daha rijit bir karışım ve bundan dolayı daha dayanıklı bir karışım olabilmektedir. Ama bitümlü sıcak karışımların esnek olması da önem arz edilmektedir.

3.10. Schellenberger Bitüm Süzülme (Akma) Deneyi (TS EN 12697-18)

Bu deney Almanlar tarafından geliştiren bir deney metodu olup, Uluslararası anlamda geçerli olan alternatif bir yöntem olmadığı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Schellenberger deneyi NCAT (National Center for Asphalt Tchnology) tarafından geliştirilerek önerilen bir deneydir. Bu deney hem laboratuvar dizaynı hem de şantiye kontrolü olarak geliştirilmiş ve kullanılmaktadır.

$145 \pm 5^{\circ}\text{C}$ modifiye bitüm karışımı 1000 gr hazırlayıp cam beher içine konularak tartılır. Beher ağzı kapatılır ve 1 saat 170°C sıcaklıkta etüvde bırakılır. Bir saatten sonra karışım etüvden alınıp cam beher sarsmadan boşaltılır, boşaltılan karışım ağırlığı alınır ve elde edilen ağırlık kaybı yüzde cinsinden hesaplanır. TS EN 12697-18 göre bitüm akması maksimum %0,3 olmalıdır (KGM, 2013). Şekil 3.17’de bitüm süzülme deneyi gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Bitüm süzülme deneyi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışma kapsamında TMA Tip 1 için tasarım yapılmıştır. Kaba agregası, ince agregası ve filler olarak bazalt kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Bu çalışmada üç tip karışım hazırlanmış, hiçbir katkı kullanmadan (katkısız) sadece 50/70 bitüm ile hazırlanmış karışım, piroliz sonucundan elde edilen katı polipropilen 50/70 bitüm ile modifiye edilmiş ve SBS (styrene butadiene styrene) ile 50/70 modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu üç tip karışım için bitüm süzülmesini (akmasını) engellemek için selülozik elyaf kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de karışım özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Karışım tasarım özellikleri

Kullanılan agregası	Bitüm penetrasyonu	Modifiye bitüm katkısı	Elyaf
Bazalt	50/70	-	Selülozik elyaf
Bazalt	50/70	Polipropilen	Selülozik elyaf
Bazalt	50/70	SBS	Selülozik elyaf

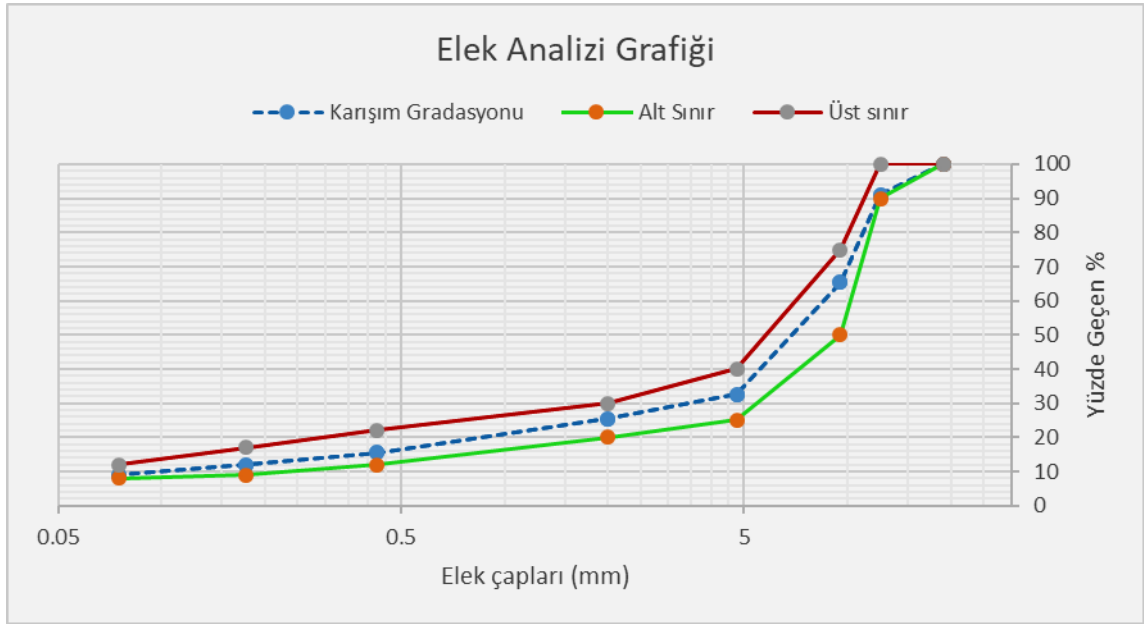
4.1. Agregası Deneyleri

4.1.1. Elek Analiz Deneyi ve Gradasyon Eğrisinin Çizimi

Karışımında kullanılan bazalt agregası tane dağılımını belirlemek için elek analizi deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.2’de gösterilen ve şartnamede TMA Tip-1 aşınma için önerilen sınır değerler ile kullanılmış olan gradasyon belirlenmiştir. Çizilen gradasyon Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Elek analizi ve agregası miktarları

Elek Çapı		Karışım Gradasyonu (%)	Elekte Kalan (%)	Agregası Miktarı (g)
İnç	mm			
3/4	19	100	9	103,5
1/2	12,5	91	25,6	294,4
3/8	9,5	65,4	32,9	378,35
No 4	4,75	32,5		
No 10	2	22,4		
No 40	0,425	15,5	32,5	373,75
No 80	0,180	12		
No 200	0,075	9		
Toplam				1150



Şekil 4.1 Karışım gradasyon eğrisi

4.1.2. Agrega deney sonuçları

Karışımında kullanılan bazalt agregası üzerinde yapılan özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Agrega deney sonuçları

Özellikler	Agrega Tipi		
	Kaba Agrega (bazalt)	İnce Agrega (bazalt)	Filler (bazalt)
Hacim Özgöl Ağırlık	2,604	2,61	
Zahiri Özgöl Ağırlık	2,74	2,746	2,705
Su Emme (%)	1,87	1,92	
Los Angeles Aşınma Değeri %		14	TS-EN 1097-2
Yassılık İndeksi %		14,6	TS-EN 933-3

4.2. Piroliz deneyinden elde edilen katkı maddesi

Bilindiği üzere plastiklerin birçok sektörde geniş kullanım alanı mevcuttur. Küresel plastik üretimi yıllar boyunca artmaktadır. Plastik talebindeki artış ile beraber depolama alanlarında plastik atıkların birikmesine neden olarak birçok çevre sorunlarını sebep olmakta, ayrıca plastiklerin petrol esaslı malzeme olmasından dolayı yenilenemeyen fosil yakıtların bir sonucu olarak petrolün tükenmesine de sebep olmaktadır. Plastik atıkların yönetimi için bazı alternatif geri dönüşüm ve enerji kazanım yöntemleri geliştirilmiş fakat plastiklerin ayrışma işlemi yüksek işçilik maliyeti

istediğinden, geri dönüşümün bazı dezavantajları olabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar yüksek enerji geri kazanım yöntemine dikkat çekmişlerdir. Araştırmalar ve gelişmiş teknoloji sayesinde, plastik atıkların enerjiye dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Plastik üretiminin ana kaynağı petrol olduğundan plastiklerin piroliz işlemiyle sıvı yakıtı geri kazandırılması büyük bir potansiyele sahiptir. Çünkü, üretilen yakıt, ticari yakıt ile karşılaştırılabilir yüksek kalorifik değere sahiptir. Aynı anda sıvı ve gazları üretmek için kullanılan piroliz işlemi, ham petrokimyasalları geri kazanmak, atık plastiklerden enerji üretmek veya hidrokarbon elde etmek için elverişli olabilir (Akmaz, 2020).

Piroliz deneyinde en önemli parametre deneyin sıcaklığı olup sıcaklık değiştiğince elde edilen katı ve sıvı ürün değişmektedir.

Akmaz, (2020) yaptığı çalışmada bitümlü bağlayıcıya katkı olarak etkilerin tespiti maksadıyla, tüm plastik karışım grupları için 300–350°C sıcaklıklar arasındaki piroliz ürünlerinin değerlendirilmesinin uygun olacağını tespit etmiştir.

Bu çalışmada Blok Kopolimer polipropilen (PP) atığından 1000gr numune hazırlanmış Şekil 4.2 gösterilmiştir. Hazırlanan numune cihazın kontrol biriminde sıcaklığı 180°C'ye, getirilmiştir. Deney başlamasından 20-25 dakika sonra sisteme N₂ (azot) gazı akışı sağlanmıştır. Göstergeden okunan reaktörün ulaştığı son sıcaklık 330°C okunmuş ve sıcaklık düşüşüyle beraber deney ısısı kapatılıp, sonlandırılmıştır.



Şekil 4.2 Polipropilen atığından numune hazırlama

Deney bittikten sonra piroliz cihazı soğumaya bırakılır, belli bir soğukluğu geldikten sonra bağlantılar sökülür ve reaktör ile sıvı toplama kaplarında biriken (boru

çeperleri dâhil) katı ve sıvı ürünler tartılarak piroliz ürün verimleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Katı} = \frac{\text{katı ürün miktarı (gr)}}{\text{Toplam hammadde (gr)}} \times 100 \Rightarrow \% \text{ katı} = 51,85$$

$$\% \text{ Sıvı} = \frac{\text{Sıvı ürün miktarı (gr)}}{\text{Toplam hammadde (gr)}} \times 100 \Rightarrow \% \text{ Sıvı} = 32,4$$

$$\% \text{ Gaz} = 100 - (\% \text{ katı ürün} + \% \text{ sıvı ürün}) \quad \% \text{ Gaz} = 15,75$$

Deney sonunda elde edilen katı ürün ve sıvı ürün Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Piroliz sonucunda elde edilen katkı maddesi

4.2.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilmesi

Bu çalışmada iki farklı katkı, polipropilen piroliz ile elde edilen katı maddesi ve SBS (styrene butadiene styrene) Kırıkkale Rafinerisi 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı ile gerekli koşullarda karıştırılmış ve modifiye bitümler hazırlanmıştır. Modifikasyon işleminde önemli ve dikkat edilmesi gereken parametreler karıştırma hızı, sıcaklık ve karıştırma süresidir. Bunun için plastiklerin bağlayıcı ile modifikasyonu konusunda, ilgili çalışmalar gözden geçirilmiş ve gerekli modifikasyon parametreleri belirlenmiştir.

Genel olarak literatür çalışmaları incelendiğinde; plastiklerle bağlayıcının modifikasyonunda kullanılan sıcaklık 160–180°C arasında olduğu belirlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcıların uzun süre yüksek sıcaklıklarda kalması oksidasyona sebep olmaktadır. Oksidasyon, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasına yol açar ve yaşlanma, bağlayıcının en önemli özelliklerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Buna göre bitümü

bağlayıcıların uzun sürede yüksek sıcaklıklarda kalmamasına dikkat edilmelidir (Akmaz, 2020).

Karıştırma hızları; önceki çalışmalar dikkate alarak karıştırma hızı plastiklerde 1200-1400 rpm aralarında olması istenmiştir. Bu çalışmada karıştırma hızı 1300 rpm alınmıştır. Karıştırma süresi olarak genellikle bir saat civarında alınması çalışmalarda yaygın olarak görülmüştür. Dalhat & Abdul Wahhab, (2017) yaptığı çalışmada, farklı karıştırma sürelerinde %4 katkı oranlı modifiye bitümler üretmiş ve bu bitümlere RV ve DSR deneyleri uygulamıştır. Sonuç olarak; PP için en uygun karıştırma süresi 50 dakika uygun olduğunu belirlenmiştir.

Literatür çalışmalar dikkate alındığında plastiklerin erime sıcaklığı 170°C arasında ve plastik katkı oranı %4 - %6 yoğunlaştığı görülmüştür. Bu istenilen bir durumdur çünkü PP 163°C civarında erime noktasına sahiptir. Bu incelemeler ışığında katkıların bitümle modifikasyonunun zor olmayacağı düşüncesi ile sıcaklık çok yüksek (180°C) seçilmemiş ve modifikasyon süresince 170–180°C aralığında sıcaklık belirlenmiştir. Şekil 4.4'te Modifiye edici mikser cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Modifiye bitüm mikseri

Sonuç olarak; polipropilen pirolizinden (PPP) elde edilen katı maddesi ve SBS katkısı Şekil 4.4'te gösterilen modifiye bitüm makinesinde %5 PP katkısı ve %4,5 SBS katkısı bitüm ağırlığını göre Kırıkkale Rafinerisi'nden tedarik edilen 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı ile ayrı ayrı karıştırılmıştır.

4.3. Bitüm Deneyleri

Bu çalışmada Kırıkkale rafinerisinde üretilmiş 50/70 bitümü kullanılmış ve modifiye etmek için %5 piroliz polipropilen (PPP) ve %4,5 SBS kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Bitüm deneylerin sonuçları

Deney Adı	Deney standardı	Birim	Deney Sonucu
Bitüm Özgül Ağırlığı	TS-EN 15326	gr/cm ³	1.031
Penetrasyon 50/70 bitüm	TS-EN 1426	0.1mm	53.5
%5 PPP ile modifiye bitüm penetrasyonu	TS-EN 1426	0.1 mm	42,7
%4,5 SBS ile modifiye bitüm penetrasyonu	TS-EN 1426	0.1mm	37.8
Yumuşuma noktası 50/70 bitüm	TS EN 1427	°C	51.5
Yumuşama noktası (%5 PPP)	TS EN 1427	°C	62
Yumuşama noktası (4,5 SBS)	TS EN 1427	°C	67

4.4. Marshall Karışım Dizaynı

Laboratuvarda belirlenmiş olan agregada gradasyonları esas alınarak, 1150 g ağırlığında agregada, bitüm oranları sırasıyla %5, %5,5, %6, %6,5, %7, %7,5 olacak şekilde her bitüm oranına sahip 3'er adet numune olmak üzere toplam 18 adet numune hazırlanmıştır. 3 tip karışım toplam 54 adet numune 160°C karışım sıcaklığıyla hazırlanmıştır. Bu üç karışım, karışım ağırlığına göre %0,5 elyaf ve bitüm ağırlığına göre %5 PPP ve %4,5 SBS modifiye edici katkı kullanılmıştır.

Marshall metoduna göre TMA karışımlarda her yüzüne 50 vuruş yapılan dizayn sonuçlarına göre optimum bitüm miktarları, agregada ağırlığına göre; saf bitüm için %6.2, %5 PPP ile modifiye edilen bitüm için %6,3 ve %4,5 SBS ile üretilen karışım için ise %6,6 olarak bulunmuştur. Bölüm 3'te anlatılan Marshall tasarım yöntemi yardımıyla hesaplamalar yapılmış ve sonuçları aşağıdaki gibidir.

Marshall Tasarım Sonuçları;

Bu çalışmada kullanılan katkı maddelerinin taş mastik asfalt karışımların Marshall stabilite özelliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Agreg a ve bitüm ile hazırlanan silindirik briketlere 50,8 mm/dakikalık hızda yükleme uygulanmıştır. Her bir briketin gösterdiği maksimum direnç ölçülmüştür. Maksimum yük stabilite değeri olarak alınır ve bu yüke karşılık gelen maksimum deformasyon değeri plastik akma olarak alınır. Agreg a ve bitüm deney sonuçları aşağıdaki gibidir.

Bitüm özgül ağırlığı		= 1,031
%5 PPP özgül ağırlığı		= 1,037
%4,5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm özgül ağırlık		= 1,041
Bitüm penetrasyonu		= 52,5
Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı		= 2,604
Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı		= 2,74
İnce agreganın hacim özgül ağırlığı		= 2,616
İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı		= 2,758
Filler zahiri özgül ağırlığı		= 2,705
Agreg a karışımının efektif özgül ağırlığı		= 2,679
Kaba agreg a yüzdesi	%K = 100 – 32,5	= 67,50
İnce agreg a yüzdesi	% İ = 32,5 – 9	= 23,50
Filler yüzdesi	%F	= 9

$$\text{Agreg a karışımının hacim özgül ağırlığı } SG_H = \frac{100}{\frac{67,5}{2,604} + \frac{23,5}{2,616} + \frac{9}{2,705}} = 2,616$$

$$\text{Agreg a karışımının zahiri özgül ağırlığı } SG_{sz} = \frac{100}{\frac{67,5}{2,740} + \frac{23,5}{2,758} + \frac{9}{2,705}} = 2,741$$

Hesaplamalar; bu kısımda sadece %5 bitüm yüzdesindeki briketler için hesaplanmıştır. Diğer bitüm yüzdelerindeki briketlerin deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

İlk briket için:

D_p = sıkıştırılmış karışımın (briketin) pratik yoğunluğu

$$D_p = \frac{\text{Havadaki Ağırlık}}{\text{doy.yüz.k.Ağ.} - \text{Sudaki Ağırlık}} = \frac{1198,5}{1206,5 - 686} = 2,303 \text{ gr/cm}^3$$

Diğer iki briketin pratik yoğunluğu 2,323 gr/cm³ ve 2,304 gr/cm³ olarak hesaplanmıştır.

Buna göre ;

$$\text{Ortalama } D_p = \frac{2,303+2,323+2,304}{3} = 2,310$$

$$\text{Maks. Teorik öz. Ağ, } D_T = \frac{100+W_{asf}}{\frac{100}{SG_{ef}} + \frac{W_{asf}}{SG_{asf}}} = \frac{100+5}{\frac{100}{2,679} + \frac{5}{1,031}} = 2,49$$

$$\text{Hava boşluğu \%si, } V_h = \frac{DT-D_p}{DT} * 100 = \frac{2,49-2,31}{2,49} * 100 = \%7,2$$

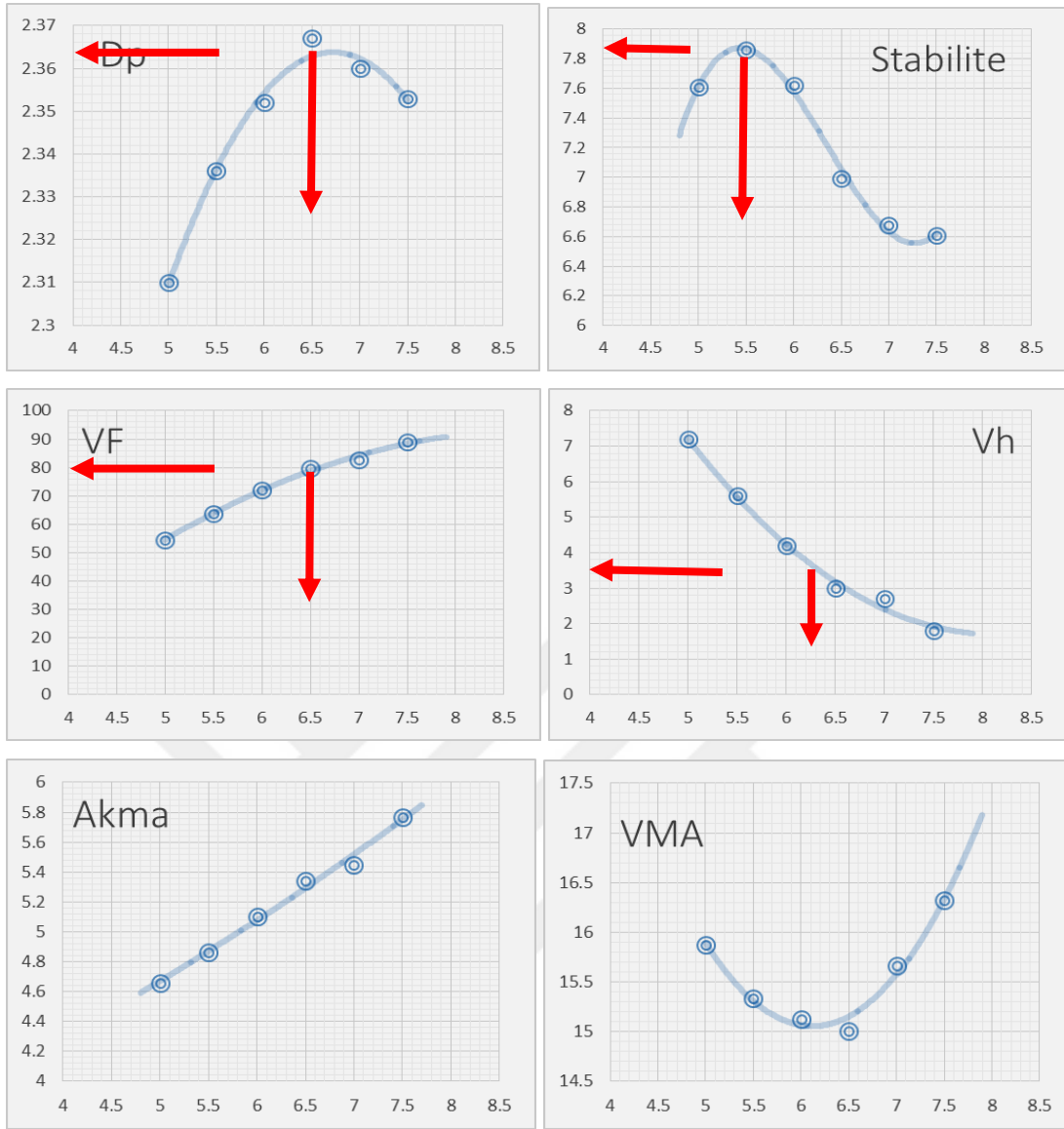
Agregalar arası boşluk yüzdesi (%);

$$VMA = \frac{D_p}{SG_h} * \frac{100}{100+W_{asf}} * 100 = \frac{2,310}{2,616} * \frac{100}{100+5} * 100 = \%15,87$$

Bitümle dolu boşluk yüzdesi (%);

$$V_{fb} = \frac{VMA-V_h}{VMA} * 100 = \frac{15,87-7,2}{15,87} * 100 = 54,56$$

Her briket için gerekli yoğunluk, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra aşağıdaki Şekil 4.5'te grafikleri çizilir ve optimum bitümü hesaplanır.



Şekil 4.5 Marshall deney grafikleri

Şekil 4,5 gibi grafikler çizilir ve ilk dört grafikten elde edilen optimum bitüm değerlerinin (en yüksek Dp 'ye karşılık gelen bitüm oranı + en yüksek stabiliteye karşılık gelen bitüm miktarı + V_f grafiği şartname ortalama değerden indirilen dikmeye karşılık gelen bitüm oranı + V_h grafiği şartname ortalama değerden indirilen dikmeye karşılık gelen bitüm miktarı) ortalaması alınarak tasarımdaki optimum bitüm değeri elde edilir.

$$\text{Optimum bitüm} = \frac{6,5+5,5+6,5+6,25}{4} = 6,2 \text{ bulunmuştur.}$$

Aynı şekilde modifiye edilmiş bitümlerin hesaplamalar yapılmış ve grafikleri çizilmiştir. Çizelge 4.6 ve çizelge 4.7 deney hesapları verilmiştir. Optimum bitüme göre Marshall dizayn sonuçları Çizelge 4.8 de verilmiştir.

Çizelge 4.6: % 5 PPP ile yapılan karışımların Marshall dizaynı

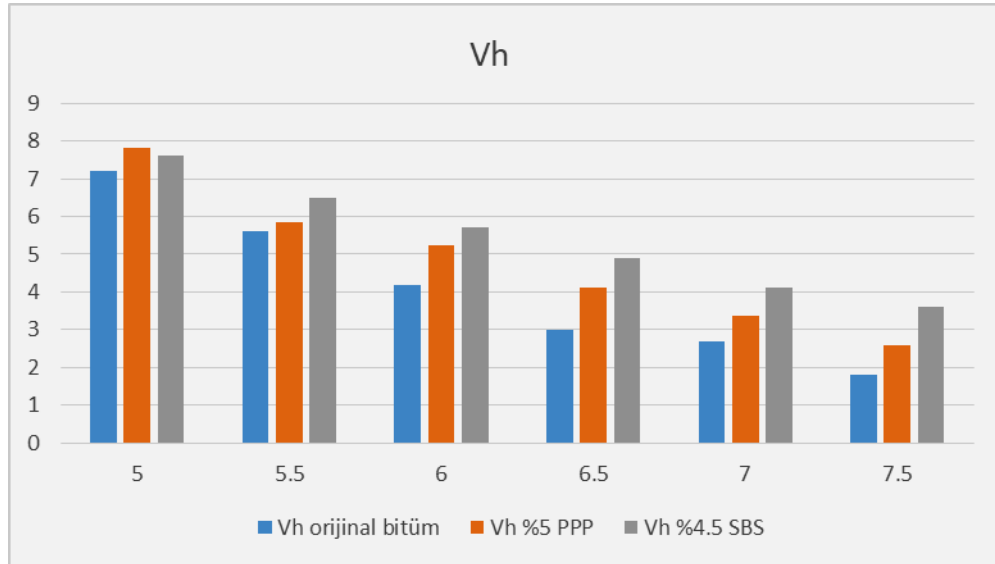
%5 ppp ile oluşturulan Marshall dizaynı																								
Bitüm	Sıcaklık °C	Yükseklikler (mm)				Havadaki Ağırlık g	Sudaki		Doy yüz. Ağırlık g	Hacim Cm ³	Hacim özg ağırlık DP	Maks teo Özgül Ağı. DT	%	Boşluk Vh	%	Asf. Dol Boşluk Vf	Akma mm	Stabilite kg	Düz fak	Düzelt Stabil kg				
		1	2	3	orta		A	C																
Wa%	g																							
5	57.5	160	68	68	68.0	1199	690	1214.1	524.1	2.29							3.55	8.44	0.898	7.58				
5	57.5	160	67	67	67.3	1204.5	691.5	1214.6	523.1	2.30							3.62	8.76	0.915	8.02				
5	57.5	160	67	67.5	67.2	1205.5	692	1217.3	525.3	2.29							3.49	9.13	0.918	8.38				
5.5	63.25	160	66	66.5	67	66.5	698	1216.8	518.8	2.34	2.490	7.81	16.41	52.42	3.55		3.83	9.42	0.934	8.80				
5.5	63.25	160	67	67	67.5	1213	696	1218.2	522.2	2.32							4.15	8.89	0.918	8.16				
5.5	63.25	160	66.5	67	66.5	1212.5	696	1217.6	521.6	2.32							3.67	8.53	0.93	7.93				
6	69	160	67	67	66.5	1213	697.5	1217.3	519.8	2.33	2.473	5.85	15.61	62.50	3.88		4.65	8.45	0.928	7.84				
6	69	160	66.5	67	66.5	1220.5	701.5	1223.2	521.7	2.34							4.28	8.18	0.93	7.61				
6	69	160	66.5	66.5	67	1208.5	691	1213.9	522.9	2.31							3.87	8.3	0.93	7.72				
6.5	74.75	160	66.5	66	66.5	1225.5	706	1227.6	521.6	2.35	2.457	5.24	16.01	67.29	4.27		4.32	8.16	0.938	7.65				
6.5	74.75	160	67	67.5	66.5	1220	700	1220.8	520.8	2.34							4.68	8.08	0.923	7.46				
6.5	74.75	160	66.5	67	67.5	1222.5	700.5	1225.4	524.9	2.33							4.55	7.56	0.923	6.98				
7	80.5	160	66	66.5	66.5	1230.5	709	1231.9	522.9	2.353	2.441	4.12	15.96	74.21	4.52		4.89	7.68	0.938	7.20				
7	80.5	160	65.5	65.5	66	1216	697.5	1218	520.5	2.336							4.75	6.74	0.949	6.40				
7	80.5	160	66	66	65.5	1225.5	705.5	1228.8	523.3	2.342							4.8	7.54	0.947	7.14				
7.5	86.25	160	66	66.5	66.5	1228.5	705.5	1229.2	523.7	2.35	2.425	3.36	16.24	79.28	4.81		4.95	6.78	0.938	6.36				
7.5	86.25	160	65	65.5	66	1219.5	701.5	1220.2	518.7	2.35							5.15	6.67	0.953	6.36				
7.5	86.25	160	65.5	66	66	1227.5	705.5	1228.5	523	2.35							5.35	6.92	0.947	6.55				
7.5	86.25	160	66	66.5	66.5	1228.5	705.5	1229.2	523.7	2.35	2.410	2.58	16.48	84.33	5.15		5.15			6.42				

Çizelge 4.8 Laboratuvar Marshall karışım dizayn sonuçları

Özellikler	Orijinal bitüm (katkısız)	% 5 PPP ile modifiye	%4.5 SBS ile modifiye	KTŞ sınır değerleri
Dizayna göre optimum bitüm (Ağırlıkça 100'e)	6,2	6,3	6,6	
Pratik özgül ağırlığı	2,36	2,34	2,33	
Stabilite KN	7,46	7,45	7,46	
Boşluk (Vh) %	3,78	4,45	4,63	2 ~4
Asfaltla dolu boşluk (VFA) %	74,83	72,87	71,88	
Agregalar arası boşluk (VMA) min. %	15,06	15,90	17,08	16
Akma, mm	5,16	4,39	3,95	2 ~ 4
Elyaf miktarı %	0,5	0,5	0,5	0.3 ~ 1
Bitüm Süzülme deneyi maks	0.11	0.24	0.2	0.3

Karışımların boşluk yüzdesi

Taşıtlardan gelen yük (tekerlekten), bitümlü maddelerin bağlayıcı etkisiyle bir arada tutulan taş iskelet tarafından taşınmaktadır. Agregalar arasındaki boşluğun bir kısmı bağlayıcı tarafından doldurulur ve geri kalanı hava boşlukları kalır. BSK kaplamalarda hava boşlukları kalması gereklidir. KGM'ye göre TMA kaplamalarda hava boşluğu %2-4 arasındadır. Şekil 4.6'de hava boşluk yüzdeleri gösterilmiştir.

**Şekil 4.6** Hava boşluk yüzdesi (Vh)

Şekilde görüldüğü gibi bitüm içeriği artıkça hava boşlukları azalmaktadır. Başlangıçta hava boşlukları bir birine yakın olmasını rağmen en fazla oran orijinal bitümde (katkısız) gözlenmiştir.

V_h (hava boşluğu) ülkelere göre değişiklik gösteriliyor, Danimarka'da VMA, V_f (bitümle dolu boşluk) ve V_h (hava boşluğu) için şartlar vardır. Diğer ülkelerde ise sadece V_h için kriterler mevcuttur. Boşluk oranındaki sınır değerler aşağıdaki Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Bu durum farklı ülkelerde boşluk hesabı esaslarının farklı olabildiğini göstermektedir. Teorik olarak boşluk oranı % 1 ile % 12 (özel karışımlarda) arasında değişmektedir. Ancak % 3'ün altındaki boşluk oranı Stabilitate problemi nedeniyle risklidir ve genellikle % 6-8 boşluk normal bir değerdir (EAPA, 1998).

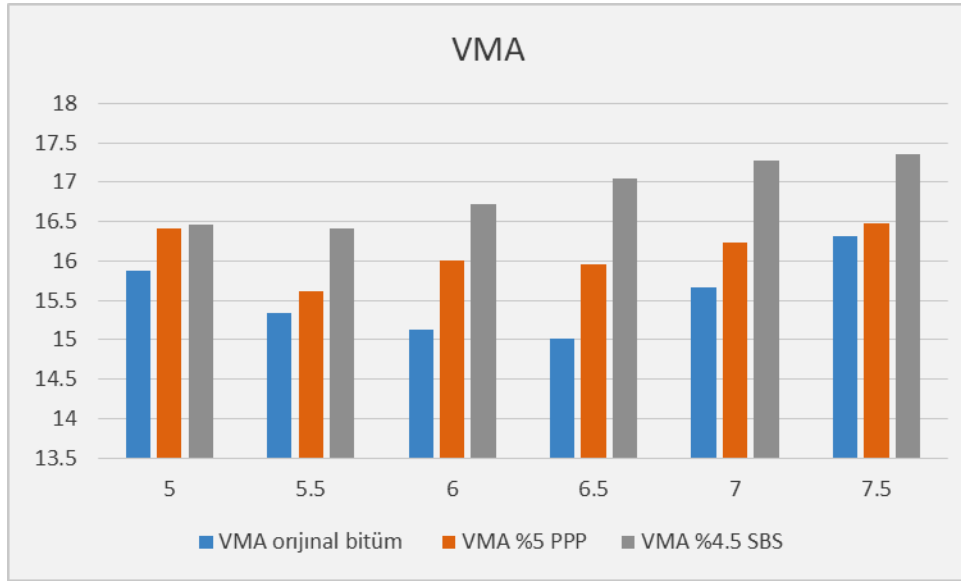
Çizelge 4.9 Avrupa ve Amerika'da yaygın olarak kullanılan V_h değişim aralığı (Marshall dizaynı esas alınarak üretilen karışımlar için) (EAPA, 1998)

TMA tipi	Boşluk oranı, V_h %
0/5 – 0/6	2 - 4
0/8	2 - 5
0/9 – 0/10	3 - 6
0/11 – 0/12	1 - 5
0/14	2 - 5
0/16	2 - 5

Agregalar arası boşluk (VMA)

VMA, agrega daneleri arasındaki hava boşluğu ile bitümlü bağlayıcı hacminin toplamının toplam numune hacmine oranının yüzdesi olarak ifadesidir. Eğer VMA yüksek olursa agrega danelerinin bitümlü madde içinde yüzme tehlikesi olabilmektedir. Bu durumda taşıyıcı iskelet dağılır ve kaplama taşıyıcılığı ortadan kalkar.

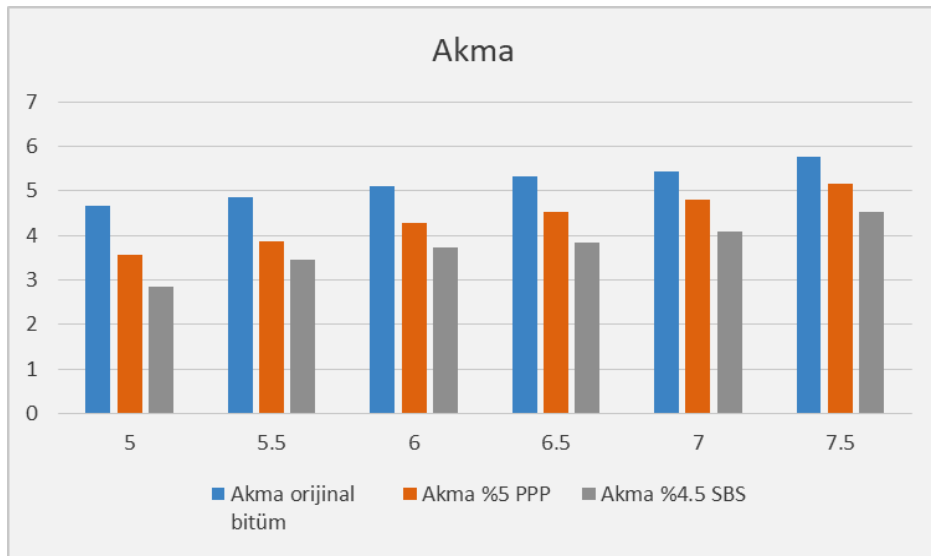
KTŞ'ye göre VMA değeri minimum %16 olmalıdır. Şekil 4.7'de bu değer orijinal asfaltta sağlanmadığı görülmüştür.



Şekil 4.7 VMA yüzdesi

Karışımların Akma ve Stabilitesi

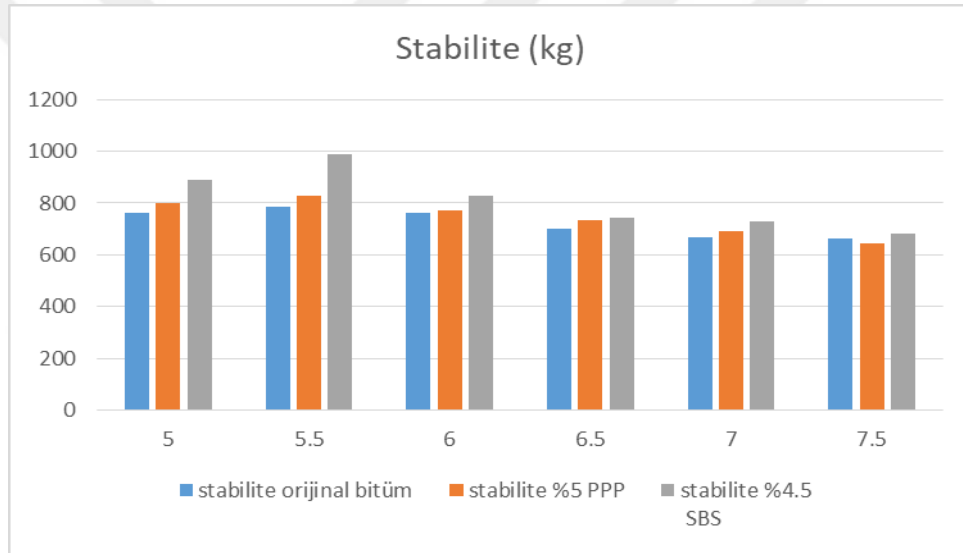
Akma, maksimum yük altında briketin uğramış olduğu deformasyon miktarıdır. Şekil 4.8’de bitüm ve akma ilişkisi gösterilmiştir. Grafıklara baktığımızda bitüm içeriği artıkça akmada artış görülmüştür. KTŞ’ye göre %4,5 SBS ile modifiye edilmiş karışım sınır değerler içerisinde kalmıştır ardından %5 PPP ile modifiye edilmiş karışım daha az akma değerine sahiptir. Bu üç karışımın maksimum akmanın katkısız bitümde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8 Akma ile bitüm arasındaki ilişki

Stabilite, briketin yük altında deformasyona gösterdiği maksimum direnç değeridir. Aşağıdaki Şekil 4.9'a baktığımızda SBS ile modifiye edilmiş karışım en yüksek stabilite değerine sahiptir. Bu üç karışıma baktığımızda başta bitüm içeriği arttıkça stabilite de artmakta, ardından bitüm içeriği arttıkça stabilitede azalma meydana gelmiştir.

TMA karışımlar geleneksel asfalt karışımlara nazaran düşük stabilite değerine sahiptir. Sadece stabilite değerlerine bakıp kabul veya red cevabını vermenin yanlış olduğunu vurgulayan çalışmalar mevcuttur. ABD'de yapılan çalışmaların sonucunda TMA karışımlar için net bir sayı vermekten kaçınılmıştır. Uzmanlar stabilite değerinin 455 kg değerine kadar kabul edebilir bir değer olduğunu belirtmişlerdir (İzol, 2020).



Şekil 4.9 Marshall stabilite değerleri

5. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada; kaba, ince agrega ve filler olarak bazalt kullanılmıştır. Modifiye katkı olarak atık polipropilen pirolizinden elde edilen katı madde kullanılmıştır. Atık polipropilen kullanım amacı kaynakları korumak ve çevre kirliliği azaltmaktır. Bunun yanında yaygın olarak TMA karışımlarda modifiye etmek için kullanılan SBS (styrene butadiene styrene) katkısı ile briketler hazırlanmıştır. TMA karışımlarda bitüm içeriği fazla olduğundan dolayı, bitüm akmasını önlemek için selüloz elyaf (viatop) kullanılarak karışımlar oluşturulmuştur.

- PPP ve SBS ile modifiye edilmiş bitümler saf bitüme nazaran yumuşama noktalarının arttığı ve penetrasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Modifiye edilmiş bitümlerdeki penetrasyon değerindeki azalış, bitümlü bağlayıcının daha sert kıvama geldiğini ve yumuşama noktasındaki artış bitümün daha yüksek sıcaklıklarda yumuşadığını gösterir. Böylelikle; bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve tekerlek izi direncine, katkıların olumlu olacağı söylenebilir.
- Yapılan çalışmada bitüm oranı az olan karışımlarda boşluk oranı şartnamenin üstünde çıkmış fakat bitüm oranı artıkça şartnamede belirtilen değerlerin arasında olduğu görülmüştür. Burada PPP ile hazırlanan karışım boşluk oranı optimum bitüme göre %4.45, SBS ile hazırlanan karışım %4.63 ve saf bitüm ile yapılan karışım %3,78 bulunmuştur. Gördüğünüz gibi modifiye karışımlar yüksek boşluk oranını sahip bunun nedeni ise agrega üzerine kalın bir film tabakası oluşturmakta ve Stabilitate ve soyulmaya karşı yüksek dirençlidir.
- VMA'nın yüksek olması istenen bir durum değildir, VMA değeri KTŞ'ya göre en az %16 dır. Optimum bitüme göre PPP ile modifiye edilmiş karışım %15.9, SBS ile modifiye edilmiş karışım %17.08 ve saf bitüm göre %15.06dir. SBS katkısıyla oluşturulan modifiye bitüm karışımların optimum bitüm yüzdesindeki VMA değeri %17,08, diğer iki karışıma göre yüksek olduğu görülmüştür. VMA'nın yüksek olması, agrega danelerinin bitümlü madde içinde yüzme tehlikesi doğurur. Böylece taşıyıcı taş iskeleti dağılır ve kaplama yük taşıyacak durumdan çıkar. Kaplamada kasma, toplama, agrega danelerinin birbirinden daha çok ayrılmasına, dolayısıyla trafik yükleri altında karışım kararlı olmamasına ve kalıcı deformasyona neden oluyor.

- Akma; maksimum yük altında briketlerin uğramış olduğu deformasyon (plastik deformasyon) miktarıdır. Çalışmada bitüm içeriği artıkça akma değeri sürekli olarak artmıştır. Burada PPP ile modifiye edilmiş optimum bitüm oranına göre 4.39mm, SBS ile modifiye edilmiş karışım optimum bitüm oranına göre 3.95mm ve saf bitüm 5.16 olarak bulunmuştur. Polimer Modifiye karışımların orijinal bitüme göre akma değerleri az ve KTŞ sınır değerlerini içerisindedir. Akma değerleri karşılaştırdığında, saf bitüm karışımlar yüksek akma değerini sahiptir. Aynı zamanda bu karışım diğeri karışımlara oranla daha esnek olduğu söylenebilir.
- Stabilité, briketlerin deformasyon karşısında gösterdiği maksimum direnç olarak tanımlanır. Stabilité değerlerini baktığımızda modifiye bitümlü karışımlar yüksek stabilité değerine sahip özellikle SBS ile modifiye edilmiş bitüm yüksek stabilité değerine sahiptir. Bu çalışmada optimum bitüm oranına göre Stabilité değerler PPP ile modifiye edilmiş karışım 745kg, SBS ile modifiye edilmiş karışım 746kg ve saf bitüm modifiye edilmemiş karışım 746kg değerleri sahiptir. Bu çalışmada TMA karışımlar geleneksel asfalt karışımlara göre Stabilité değerleri birbirine yakındır ama modifiye edilmiş karışımlar optimum bitüm oranları yüksektir.
- Bitüm süzülme deney değeri PPP, SBS ve saf sırasıyla %0.24, %0.2 ve %0.11 olarak bulunmuştur. Bulunan değerler KTŞ şartnamesine göre uygundur. Bitüm süzülme deney sonuçlarına baktığımızda en iyi değeri saf bitüm sahiptir. Bunun nedeni ise modifiye bitümlerin viskozite değerleri düşük, dolayısıyla bitüm agrega tarafından bir kısmı emilir ve agrega yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturur.

Kaynaklar

- Akmaz, M. (2020). Farklı plastik atıkların birlikte pirolizinden elde edilen katı ürünle modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Doktora tezi*.
- AAPA. (1997). Design and Performance of Stone Mastic Asphalt, Open Graded Asphalt Courses, and Intersection Mixes. *AAPA International Flexible pavements Conference*.
- Ahmadinia, E. ve Karim, M. (2012). Performance Evaluation of Utilization of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) in Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials* 36 .
- Akın, D., Varlı, Ç. ve Uluçaylı, M. (tarih yok). Karayolu esnek üstyapısının bilgisayar kullanılarak AASHTO yöntemi ile tasarımı. *İnşaat Mühendisleri Odası İzmir*.
- Al-Hadidy, A., ve Tan , Y.-Q. (2009). Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements. *Materials & Design* 30.4.
- Alp, B. Aşınma Asfalt Betonu Ve Taş Mastik Asfalt Tekniğinin Köprü Uygulamalarında Kullanılması Ve Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi.
- Altan, F. (2018). Taş Mastik Asfaltta Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması Ve Doğal Agregası İle Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi.
- Arslan, D. (2010). Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin. Doktora Tezi.
- Arslan, F. (2014). Taş Mastik Asfalt Karışımlarında İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük - Kumtaşı Ve Karatepe - Bazaltlı Kullanımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Aslan, İ. (2020). Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Doğal Kenevir Lifinin Selülozik Fiber Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi .
- Aslıhan, A. (2007). Sert Plastik Ambalajlar, Ambalaj sanayicileri derneği iktisadi işletmesi, İstanbul. 11–47.
- Blazejowski, K. (2011). *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice* CRC press.
- Campbell, C. (1999). The use of stone mastic asphalt on aircraft pavements.". *Final Report, Deakin University, Melbourne, Australia* .
- Dalhat, M., ve Abdul Wahhab, H. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*.

- EAPA. (1998). Heavy duty surfaces. The arguments for SMA. European Asphalt Pavements. *European Asphalt Pavement Association*.
- ESOGÜ. (2020). *ESGÜ -İnşaat Müh. Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı*. ESGÜ -İnşaat Müh. Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı: <https://www.youtube.com/watch?v=bj6LnKEWbQE> adresinden alındı
- Güngör, A., Orhan , F., ve Kasak , S. (2012). The Determination Of Performance Of Wearing Course Mixtures Using Advanced Asphalt Tests. Istanbul, Turkey.: 5th Eurobitume & Eurasphalt Congress.
- GÜNGÖR, A., ORHAN, F., KAŞAK, S., & ÇUBUK, M. (2017). Diatomit'in Taş Mastik Asfalt Karışımında Kullanılması.
- Güngör, G., ve Sağlık, A. (2009). Mekanistik Ampirik Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uyarlanması.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez , İ., & Eren, K. (2001). Asfalt Ve Uygulamaları. *Asflat Bilimsel yayın no 1*.
- İTÜ, ve UBAK . (2005). Ulaştırma ve Ulaşım Araçları Uyg-Ar Merkezi Ulaştırma Ana Planı Stratejisi Sonuç Raporu. Ankara.
- İzol, E. (2020). Taş Mastik Asfalt Yapımında Mineral Filler Olarak Mermer Tozunun Kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi*.
- Kabadayı, E. (2019). Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*.
- KGM. (2013). Karayolları Teknik Şartnamesi. *Yayın No: 276*.
- KÖK, B. (2007). Investigation of a new mixing method in production of hot mix asphalt. *Doktora tezi*.
- Mokhtari, A., ve Moghadas Nejad, F. (2013). Comparative Study on Performance of Wax-Modified and Typical SMA Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- NAPA. (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures State-of-the-Practice. *National Asphalt Pavement Association*.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları*. Ankara: Ankara yayınları.
- Özgan1, E., Serin, S., Sargın, Ş., ve Arslan, İ. (2010). Karayolu Esnek Üstyapısının Projelendirilmesi; D655-01 Karayolu Örneği. *Ulusal Meslek Yüksekokulları Öğrenci Sempozyumu*.

- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., ve Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science* 224 72–112.
- Sağlık, A., ve Güngör, G. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Şanlıer, İ. (2018). Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları, Performanslarının Karşılaştırılması Ve Maliyet Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*.
- TS 1097-2. (1998). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar. *TSE, Ankara*.
- TS EN 1426. (2008). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini.
- TS EN 1427. (2002). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilge yöntemi.
- TUNÇ, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı* . Ankara: Asil yayın Dağıtım Ltd. Şti.
- URL1,(2012).*plastik sanayicileri federasyonu*,. http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/09_Kalkinma_Plani_indd_18262.pdf adresinden alındı.
- URL2,(2018). *European plastics*. *plasticseurope*: <https://www.plasticseurope.org/en/focus-areas/strategy-plastics> adresinden alındı
- URL3.(2017).https://ekonomi.isbank.com.tr/ContentManagement/Documents/sr201711_plastiksektoru.pdf adresinden alındı.
- URL4.(2019).https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf adresinden alındı.
- URL5.*plastiksanayi*.http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/09_Kalkinma_Plani_indd_18262.pdf adresinden alındı.
- URL6.(https://www.plasticseurope.org/application/files/3715/1689/8308/2015plastics_the_facts_14122015.pdf adresinden alındı.
- URL 7. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/12/20171227-12.htm> adresinden alındı.
- URL8.<https://www.enerjiportali.com/polipropilen-nedir-nelerlerde-kullanilir/> adresinden alındı.
- URL 9. (2013). *Teknomet*. Teknomet Mühendislik Temsilcilik ve Ticaret Ltd.Şti: <http://www.teknomet.com.tr/index.php/tr/tas-mastik-asfalt.html>, adresinden alındı.

Van Bochove G, H. M. (2008). The State of The Art in The Field of Silent Road Surfaces. Proceedings of The 4th Eurasphalt And Eurobitume Congress Held May 2008, Copenhagen.

Whiteoak, D. (2004). Shell Bitüm El Kitabı Abdullah H lav ve Ayşe Lav. *İsfalt Bilimsel Yayın no 3*.

