

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA ATIK KAĞIT
BARDAK KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

Yusuf KURT

Danışman
Prof. Dr. Nihat MOROVA

ISPARTA - 2025



© 2025 [Yusuf KURT]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

25/04/2025

Yusuf KURT

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Taş Mastik Asfalt (TMA) Karışımlar	15
2.1.1. Taş mastik asfalt karışımlar ve tarihçesi	15
2.1.2. Taş mastik asfalt yapısı	18
2.1.3. Taş mastik asfalt üretimi	20
2.1.4. Taş mastik asfalt depolama, nakliye, serme ve sıkıştırma	22
2.1.5. Taş mastik asfalt uygulama alanları	23
2.1.6. Taş mastik asfaltın avantaj ve dezavantajları	25
2.1.7. Taş mastik karışımlarda fiber kullanımı	26
2.2. Atık Kağıt.....	28
2.2.1. Atık kağıtlar hakkında genel bilgiler.....	28
2.2.2. Atık kağıtların kullanımı ve geri kazanımı	29
2.2.3. Atık kağıt bardak.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Taş mastik asfalt kaplamalarda kullanılan agregalar ve gradasyon	33
3.1.2. Bitümlü bağlayıcı	37
3.1.3. Bitüm modifikasyonunda katkı olarak kullanılan Elvaloy RET	40
3.1.4. Bitüm modifikasyonda kullanılan Polifosforik asit (PPA)	41
3.1.5. Taş mastik asfaltta kullanılan selülozik fiber (SF).....	42
3.1.6. Taş mastik asfaltta kullanılan atık kağıt bardak (AKB).....	44
3.2. Yöntem.....	45
3.2.1. Agrega deneyleri	46
3.2.1.1. Elek analizi (TS EN 933-1/2).....	46
3.2.1.2. İri ve ince agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyleri (TS EN 1097-6).....	47
3.2.1.3. Mineral filler özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-7)	49
3.2.1.4. Los Angeles aşınma deneyi (TS EN 1097-2).....	50
3.2.1.5. Metilen mavisi deneyi (TS EN 933-9)	51
3.2.1.6. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık testi (M_gSO_4) (TS EN 1367-2).....	51
3.2.1.7. Yassılık indeksi deneyi (TS EN 933-3)	53
3.2.2. Bitüm modifikasyonu.....	54
3.2.3. Bitüm deneyleri	54
3.2.3.1. Penetrasyon deneyi (TS EN 1426).....	54
3.2.3.2. Düktilite deneyi (ASTM D113)	55
3.2.3.3. Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427).....	55
3.2.3.4. Parlama noktası deneyi (TS EN ISO 2719)	56
3.2.3.5. Elastik geri dönme deneyi (TS EN 13398)	56

3.2.3.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi (TS EN 12607-1, AASHTO T240, ASTM D2872)	57
3.2.3.7. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) (TS EN 14769, AASHTO R 28)	57
3.2.3.8. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi (TS EN 14770, AASHTO T315).....	58
3.2.3.9. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi (TS EN 14771)	59
3.2.4. Bitümlü sıcak karışım deneyleri	59
3.2.4.1. Marshall stabilite ve akma deneyi (TS EN 12697-34).....	60
3.2.4.1.1. Yoğunluk-boşluk analizinde kullanılan bağıntılar	68
3.2.4.2. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi	73
3.2.4.3. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi	74
3.2.4.4. Su hasarı (Nem hassasiyeti) deneyi.....	74
3.2.4.5. Schellenberg bitüm süzülme deneyi (TS EN 12697-18)	76
3.2.4.6. Kum yama deneyi	76
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	78
4.1. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Elvaloy RET Özellikleri	78
4.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Polifosforik Asidin (PPA) Özellikleri.....	80
4.3. Taş Mastik Asfaltta Kullanılan Selülozik Fiberin (SF) Özellikleri	80
4.4. Taş Mastik Asfaltta Kullanılan Atık Kağıt Bardak Özellikleri.....	81
4.5. Agrega Deney Sonuçları	81
4.6. Bitüm Deney Sonuçları	85
4.7. TMA Karışımlara Ait Deney Sonuçları	86
4.7.1. Marshall metodu ile TMA karışım dizayn sonuçları	86
4.7.2. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve su hasarı deney sonuçları.....	109
4.7.3. Schellenberg bitüm süzülme deneyi sonuçları	112
4.7.4. Yüzey dokusu (Kum yama) deney sonuçları	113
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	124

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA ATIK KAĞIT BARDAK KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Yusuf KURT

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nihat MOROVA

Günümüzde artan trafik yoğunluğu ve dingil yükleri sebebiyle, yüksek dayanıklılık ve deformasyonlara karşı daha dirençli özellikler sunan Taş Mastik Asfalt (TMA) kullanımı yaygınlaşmaktadır. TMA karışımları, tasarım özellikleri gereği yüksek boşluk oranına sahiptir. Bu durum, geleneksel asfalt kaplamalara kıyasla daha fazla bitüm içermesine ve bitümün agregadan ayrılmasına yol açmaktadır. Bu sorunu çözmek için TMA kaplamalarda mineral fiber, selüloz fiber ve benzeri katkı maddeleri kullanılarak bitüm süzülmesi engellenmektedir.

Bu çalışma, atık kağıt bardak (AKB) liflerinin TMA karışımlarda kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemekte ve bu liflerin bitüm süzülme özellikleri, nem hasarı direnci, yüzey dokusu karakteristikleri ile Marshall özellikleri üzerindeki performans etkilerini araştırmaktadır. TMA'da genellikle fiber olarak kullanılan selülozik fiber (SF) yerine AKB kullanımı hem çevresel sürdürülebilirlik hem de malzeme performansı açısından önemli bir yenilik sunmaktadır. Bu amaçla, Türkiye Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS, 2013) sınırları içinde kalan gradasyon eğrisi belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan orijinal bitüm Aliğa rafinerisinde üretilmiş ve 50/70 penetrasyon derecesine sahiptir. Çalışmada Elvaloy RET (%1.6) katkısı ve Polifosforik asit (PPA, %0.2) ile modifiye edilmiş PG 70-16 cinsi Polimer Modifiye Bitüm (PMB) kullanılmıştır. Çalışmada %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 PMB oranlarında ve %0.35 selülozik fiber (SF) katkısı ile 15 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı (OBO) belirlenmiştir. Sonraki aşamada TMA karışımında SF yerine farklı oranlarda (%0.15 %0.25, %0.35, %0.45) AKB ve fiber içermeyen (%0 NF) TMA numuneler hazırlanmıştır. Her bir AKB oranı için %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 bitüm oranlarında TMA numuneler hazırlanmış ve her bir seri için Marshall yöntemi ile OBO oranları belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm içeriklerine göre hazırlanan TMA numuneler üzerinde dolaylı çekme mukavemeti (ITS), nem hasarı (TSR), Schellenberger bitüm süzülme ve kum yama deneyleri uygulanarak karışımların ITS, TSR, bitüm süzülme ve yüzey doku derinlikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Taş mastik asfalt (TMA), Atık kâğıt bardak, Elvaloy RET, Polifosforik asit (PPA), Süzülme, Nem hasarı

2025, 124 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USE OF WASTE PAPER CUPS IN STONE MASTIC ASPHALT MIXTURES

Yusuf KURT

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Nihat MOROVA

Today, due to increasing traffic density and axle loads, the use of Stone Mastic Asphalt (TMA) is becoming more common. SMA provides high durability and strong resistance to deformation. Because of its design, SMA mixtures have a high void ratio. This results in higher bitumen content compared to traditional asphalt and can cause bitumen separation from the aggregate. To prevent this issue, mineral fiber, cellulose fiber, and similar additives are used in SMA pavements.

This study experimentally investigates the usability of waste paper cup (AKB) fibers in SMA mixtures. It examines their effects on bitumen percolation, moisture damage resistance, surface texture, and Marshall properties. Replacing commonly used cellulose fiber (SF) with AKB fiber offers innovation in both environmental sustainability and material performance. For this purpose, a gradation curve was determined within the limits of the Turkish Highways Technical Specification (KTŞ, 2013). The bitumen used was produced at the Aliğa refinery and has a penetration grade of 50/70. The study used PG 70-16 type Polymer Modified Bitumen (PMB), modified with Elvaloy RET (1.6%) and Polyphosphoric Acid (PPA, 0.2%). Fifteen samples were prepared with 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%, and 7.0% PMB ratios, including 0.35% cellulose fiber (SF). The optimum bitumen content (OBC) was determined. Then, SMA samples were prepared using WPC fibers instead of SF at different ratios (0.15%, 0.25%, 0.35%, and 0.45%) as well as fiber-free (0% NF) samples. Each AKB fiber ratio was tested with 5.0% to 7.0% bitumen content, and OBC was determined using the Marshall method. Indirect tensile strength (ITS), moisture damage (TSR), Schellenberger bitumen percolation, and sand patch tests were conducted on SMA samples. The results showed the effects of WPC fibers on ITS, TSR, bitumen percolation, and surface texture depth.

Key Words: Stone mastic asphalt (SMA), Waste paper cup, Elvaloy RET, Polyphosphoric acid (PPA), Percolation, Moisture damage

2025, 124 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Nihat MOROVA'ya, değerli hocam Arş. Gör. Hande VAROL MOROVA'ya çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, araştırmalarım sırasında yararlandığım Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'na, sağladığı kaynaklar ve olanaklar için teşekkür ederim.

Yusuf KURT
ISPARTA, 2025



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. TMA ve HMA'nın yüzey görünüşleri.....	16
Şekil 2.2. TMA'nın temel bileşenlerine bölünmesi.....	18
Şekil 2.3. Yan destekli dikey yüklenmiş taneler.	20
Şekil 2.4. Selüloz fiberli TMA üretimi için önerilen işlemler ve karışım zamanları	21
Şekil 3.1. Kireçtaşı ocağının konumu	36
Şekil 3.2. Elvaloy RET	41
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan selülozik fiber.....	44
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan atık kağıt bardak.....	45
Şekil 3.5. Deneysel çalışmalara ait akış şeması	46
Şekil 3.6. Agrega karışımı (a) ve etüv işlemi (b)	62
Şekil 3.7. Sıcak bitüm ve agreganın karışımı.....	63
Şekil 3.8. Kağıdın yağlanması (a), kalıbın yağlanması (b).....	64
Şekil 3.9. Numunenin kalıba aktarılması (a), tokmak işlemi (b)	64
Şekil 3.10. Kriko yardımıyla çıkarılma işlemi (a) Numuneler (b).....	64
Şekil 3.11. Agrega özgül ağırlık, hacim ve ağırlık kavramları	69
Şekil 3.12. Agrega özgül ağırlık, hacim ve ağırlık modellemesi	69
Şekil 3.13. Dolaylı Çekme Mukavemeti numunesi	74
Şekil 3.14. Vakum uygulaması (a), streç film ile kaplama (b) ve ITS deneyi (c).....	75
Şekil 3.15. Schellenberg deneyi	76
Şekil 3.16. Kum yama deneyi	77
Şekil 4.1. Modifiye bitüm mikseri	80
Şekil 4.2. (a) Kireçtaşı ve (b) kireçtaşına ait SEM görüntüsü.....	82
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan TMA Tip-1A aşınma tabakası karışım gradasyonu.....	84
Şekil 4.4. %0 NF fiber içermeyen karışım	95
Şekil 4.5. %0.35 SF selülozik fiber karışımı.....	96
Şekil 4.6. %0.15 atık kağıt bardak karışımı	97
Şekil 4.7. %0.25 atık kağıt bardak karışımı	98
Şekil 4.8. %0.35 atık kağıt bardak karışımı	99
Şekil 4.9. %0.45 atık kağıt bardak karışımı	100
Şekil 4.10. Optimum bitüm oranı ile fiber yüzdesi arasındaki ilişki	102
Şekil 4.11. Pratik özgül ağırlığı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	103
Şekil 4.12. V_{fa} ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	105
Şekil 4.13. V_h ve bitüm yüzdeleri arasındaki ilişki.....	106
Şekil 4.14. VMA yüzdeleri ile bitüm içeriği arasındaki ilişki	107
Şekil 4.15. VMA ile fiber içeriği arasındaki ilişki	107
Şekil 4.16. MS ve bitüm yüzdesi arasındaki ilişki	108
Şekil 4.17. Akma yüzdeleri ile bitüm içeriği arasındaki ilişki.....	109
Şekil 4.18. TMA karışımlarının dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....	110
Şekil 4.19. Çekme mukavemeti oranı sonuçları.....	111
Şekil 4.20. Schellenberg deney sonuçları	112
Şekil 4.21. Yüzey dokusu deney sonuçları	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. TMA'nın göreceli performansı.....	26
Çizelge 3.1. Kaba agrega özellikleri	34
Çizelge 3.2. İnce agrega özellikleri.....	35
Çizelge 3.3. TMA'da kullanılacak mineral filler gradasyon limitleri.....	35
Çizelge 3.4. TMA aşınma gradasyonu ve tolerans	37
Çizelge 3.5. Modifiyeli bitümün fiziksel özellikleri	39
Çizelge 3.6. Mineral elyaf özellikleri.....	44
Çizelge 3.7. Selüloz elyaf özellikleri	44
Çizelge 3.8. TMA dizayn kriterleri	67
Çizelge 4.1. Elvaloy Ret polimerinin genel özellikleri	78
Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan PPA'nın özellikleri.....	80
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan selülozik fibere ait özellikler.....	81
Çizelge 4.4. İri ve İnce agrega ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.....	82
Çizelge 4.5. Kullanılan filler malzemesinin özgül ağırlık değeri	82
Çizelge 4.6. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri	83
Çizelge 4.7. Deneylerde kullanılan agrega granülometrisi	83
Çizelge 4.8. 1050 gramlık karışımın elek üzerindeki ağırlıkları.....	84
Çizelge 4.9. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün özellikleri	85
Çizelge 4.10. Elvaloy ve PPA katkılı PMB bitümün özellikleri.....	85
Çizelge 4.11. %0 NF numunelere ait Marshall sonuçları	88
Çizelge 4.12. %0.35 SF numunelere ait Marshall sonuçları	89
Çizelge 4.13. %0.15 AKB numunelere ait Marshall sonuçları	90
Çizelge 4.14. %0.25 AKB numunelere ait Marshall sonuçları	91
Çizelge 4.15. %0.35 AKB numunelere ait Marshall sonuçları	92
Çizelge 4.16. %0.45 AKB numunelere ait Marshall sonuçları	93
Çizelge 4.17. Grafiklerden okunan Marshall sonuçları	101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Derece Celsius, sıcaklık birimi
AASHTO	American association of state highway and transportation official
AC	Asfalt çimentosu
AKB	Atık karton bardak
B50/70	Bitüm penetrasyon sınıfı
BBR	Kiriş Eğme Reometresi
BSK	Bitümlü sıcak karışım
Cm ³	Santimetreküp, hacim birimi
D _p	Pratik yoğunluk (Pratik özgül ağırlık)
DSR	Dinamik kesme reometresi deneyi (The dynamic shear rheometer)
D _t	Teorik yoğunluk
Fe	Demir
G _b	Bitümün özgül ağırlığı
G _{ef}	Efektif özgül ağırlık
G _{kh} , G _{ih}	Agregaların hacim özgül ağırlıkları
G _{kz} , G _{iz} G _{fz}	Agregaların zahiri özgül ağırlıkları
gr	Gram, kütle birimi
G _{sa}	Zahiri özgül ağırlık
G _{sb}	Hacim özgül ağırlık
HMA	Hotmix asphalt concrete
Inç (‘‘)	Uzunluğu 2.54 cm. olan İngiliz uzunluk ölçü birimi
ITS	Dolaylı (İndirekt) çekme mukavemeti
KGM	Karayolları genel müdürlüğü
Km	Kilometre, uzunluk birimi
kN	Kilonewton, kuvvet birimi
KTŞ	Karayolları teknik şartnamesi
LA	Los angeles
lb	Libre, kütle ölçüsü birimi
LS	Kireçtaşı
LS	Kireçtaşı
Mg	Magnezyum
MgSO ₄	Magnezyum Sülfata karşı dayanıklılık
mm	Milimetre, uzunluk birimi
MQ	Marshall katsayısı
MS	Marshall stabilitesi
OBO	Optimum bitüm oranı
PAV	Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi
PPA	Polifosforik asit
RMS	Kalıcı Marshall Stabilitesi
RTFOT	Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi
SBS	Stiren- butadien- stiren
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SF	Selüloz fiber
SHRP	Strategic highway research program
SMA	Stone Mastik Asfalt (Taş Mastik Asfalt)
TMA	Taş Mastik Asfalt
TS - EN	Türk standardı-Avrupa standardı
TSR	Çekme dayanım oranını

V_f	Asfaltla dolu boşluk
V_{fa}	Bitüm dolu boşluklar hacimce oranı
V_h	Hava boşluğu
VMA	Agregalar arası boşluk
W_a	Agreganın yüzdesi olarak bitüm miktarı
W_{dky}	Doygun kuru yüzey
W_i	Her dane büyüklüğü dağılımı arasında kalan toplam agrega miktarı
W_s	Her eleme eleği çapından veya şablonundan geçen toplam agrega



1. GİRİŞ

Hem ülkemizde hem de dünya çapında, yol üstyapılarının büyük bir bölümü bitümlü sıcak karışımlarla (BSK) oluşturulmaktadır. BSK, yaklaşık %93-97 oranında agrega ve %3-7 oranında bitüm içeren, belirli oranlarda karıştırılarak hazırlanan bir malzemedir. Ancak, artan trafik yükleri ve olumsuz çevresel etkiler gibi etmenler nedeniyle zaman zaman beklenen performansı sergileyememektedir (Ekmekyapar, 2021). Bu olumsuz faktörler, kaplamalarda zamanla kalıcı şekil bozulmaları, çatlak oluşumu ve yüzeyde soyulmalar gibi problemlere yol açmaktadır. Bu tür bozulmaları önlemek veya en aza indirmek amacıyla, bitüme ya da karışıma çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitüm ya da karışım elde edilmektedir (Köfteci, 2017).

Katkı maddesi veya maddeleri belirli oranlarla ve şartlarla karışıma eklenir daha sonra katkı malzemeli karışımlar belirli performans deneylerine tabi tutulur. Katkı malzemelerinin tek amacı yol üstyapısındaki bozulmaları engellemek değil aynı zamanda yapılan karışımlarda bitümün üretim aşamasındaki karıştırılabilirlik, işlenebilirlik ve serim aşamasındaki sıkıştırılabilirlik sıcaklıklarındaki viskoziteyi düşürmesidir.

Katkı maddeleri, belirlenen oranlarda ve koşullarda asfalt karışımına eklenerek hazırlanır ve ardından belirli performans testlerine tabi tutulur. Bu maddelerin temel amacı yalnızca yol üstyapısındaki bozulmaları önlemek değildir; aynı zamanda bitümün üretim sürecindeki karıştırılabilirliğini, işlenebilirliğini ve serim aşamasındaki sıkıştırılabilirlik sıcaklıklarında viskozitesini düşürerek işlevselliğini artırmaktır.

Öte yandan, asfalt karışımlarına lif eklenmesi, stabiliteyi ve dayanıklılığı artırarak önemli avantajlar sunar. Doğru miktarda lif kullanımı, BSK'nın mekanik özelliklerini geliştirir, yumuşama noktasını yükseltirken penetrasyonu azaltır ve bitümün viskoelastik özelliklerini değiştirir. Ayrıca, uygun oranlarda eklenen lifler, karışımın dinamik modülünü artırarak mastik tabakayı güçlendirir ve termal hassasiyeti düşürür. Böylece malzemenin yorulma ömrü, sünekliği ve genel dayanıklılığı iyileşir. Özellikle Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında lif katkısının, nem duyarlılığını ve basma dayanımını artırırken bağlayıcı drenajını azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra,

bazı araştırmalar lif kullanımının gözenekli asfalt karışımlarında drenaj problemlerini minimize ettiğini ortaya koymuştur (Slebi-Acevedo vd., 2019).

Karayolu üstyapıları, kullanılan malzeme türüne, özelliklerine ve inşa yöntemine bağlı olarak rijit ve esnek üstyapılar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Rijit üstyapılar, çimento betonu kaplama tabakalarından oluşurken; esnek üstyapılar, bitümlü bağlayıcılar kullanılarak üretilmektedir. Ülkemizde bilgi birikimi ve deneyim seviyesi yüksek olduğu için esnek üstyapılar daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Aslan, 2020).

Esnek kaplama tasarımlarında dört farklı asfalt betonu granülometri türü kullanılmaktadır: açık, yoğun, üniform ve kesikli granülometri. Açık granülometreli asfalt karışımları, düşük ince agrega içeriği ve yüksek hava boşluğu yüzdesi ile karakterize edilen poroz asfalt türüdür. Yoğun granülometriye sahip asfaltlar, agrega bileşenlerinin süreklilik sağladığı ve minimum hava boşluğu yüzdesi sunduğu için en yaygın kullanılan tasarımlardan biridir. Üniform granülometreli karışımlar, belirli bir dar tane boyut aralığında parçacık içerirken; kesikli granülometreli karışımlarda ise belirli elek aralığında iri agregalar daha yüksek oranda bulunur ve pürüzlü yüzeyli TMA kaplamalar elde edilir (Özdaş, 2021).

Bilimsel çalışmaların sürdüğü yeni kaplama türleri, genellikle boşluklu dane boyutu dağılımına sahip olup, modifiye ve düşük penetrasyonlu bağlayıcılar ile üretilmektedir. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan TMA, bu tür uygulamalar arasında öne çıkmaktadır (Saedi, 2019).

Bitümlü sıcak karışım (BSK), yol kaplamalarında kullanılan en eski asfalt türlerinden biridir. Son yirmi yılda dünya genelinde 12 milyon kilometre yeni yol ağı inşa edilmiş olup, 2050 yılına kadar bu rakamın 25 milyon kilometreye ulaşacağı öngörülmektedir. TMA, 1960'ların ortalarında Almanya ve İskandinavya'da geliştirilen ve zamanla Avrupa genelinde yaygınlaşan bir boşluklu karışım türüdür. Yüksek aşınma direncine sahip olan TMA kaplamaları, lastik hasarına karşı dayanıklıdır ve düşük iz yapısıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, gürültü seviyesini düşürerek kayma direncini artırır ve su sıçramasını azaltarak yağışlı hava koşullarında görüşü iyileştirir. TMA kaplamalarında iri agrega iskeleti bağlayıcı, dolgu maddesi ve lifler ile güçlendirilerek dayanıklı bir

yapı oluşturulur. Tipik olarak TMA karışımları; %70-80 iri agrega, %8-12 dolgu maddesi, %6-7 bağlayıcı ve %0.3 lif içermektedir. Karışımın derecelendirilmesi ve kullanılan asfalt bağlayıcı malzemeler, yeterli esneklik, stabilite, işlenebilirlik ve hava boşluğu sağlamaya yönelik optimize edilmektedir (Babalghaith vd., 2022).

Dünyanın pek çok ülkesinde, çivili lastiklerin neden olduğu tekerlek izlerine karşı TMA kaplamaları geliştirilmeye ve uygulanmaya devam etmektedir. Türkiye’de ise TMA, 1999 yılından itibaren yoğun trafik etkilerine karşı aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır. Bitümlü karışımların performansını artırmayı amaçlayan bu araştırma alanı, yeni tasarım ve uygulama yöntemlerini içermektedir. TMA, yüksek iri agrega içeriği ve dolgu oranı nedeniyle, modifiye bitüm kullanımı sayesinde dayanıklılık ve iz direnci açısından üstün özellikler sunmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel asfalt karışımlarına kıyasla üretim ve uygulama maliyetleri daha yüksektir. Bu maliyet artışının başlıca sebepleri, yüksek sıcaklık gereksinimi, sıkıştırma aşamalarındaki zorluklar ve selülozik elyaf kullanımının getirdiği ek masraflardır (Evirgen vd., 2021).

Polimer modifikasyonu, en yaygın kullanılan bitüm iyileştirme yöntemi olmakla birlikte, literatürde elyaf katkılarının asfalt karışımlarında olumlu etkiler sağladığı bildirilmiştir. Elyaf katkılı asfalt karışımları üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemenin kalıcı deformasyon ve yorulma çatlamasına karşı önemli ölçüde iyileştirme sağladığını göstermektedir. Yüksek çekme mukavemetine sahip belirli elyaf türleri, asfalt karışımlarının yapışkanlık özelliklerini ve mukavemetini artırarak rijitlik modülünü, nem duyarlılığını ve donma-çözülme döngülerine karşı direnci yükseltmektedir. Ayrıca, viskoelastik özelliklerdeki değişimler nedeniyle oluşan yansıma çatlaklarını da azaltmaktadır (Evirgen vd., 2021).

Bu çalışmanın temel amacı, TMA kaplamalarında karşılaşılan bitüm süzülmesi problemini azaltmak için geleneksel selülozik liflerin yerine geri dönüştürülmüş atık kağıt liflerinin kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemektir. Geleneksel lif katkısı ile üretilmiş asfalt beton numuneleri kontrol grubu olarak belirlenmiş hem geleneksel hem de atık kağıt lifleri ile hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak, Marshall tasarım yöntemi çerçevesinde optimum bitüm oranları

hesaplanmıştır. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve nem hasarı (TSR), Schellenberger bitüm süzülme testi ve kum yama yöntemi uygulanarak karışımların performans kriterleri değerlendirilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Çalışmada atık kağıt bardakların (AKB) Taş Mastik Asfalt (TMA) kaplamalarda kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. TMA karışımların hazırlanmasında Elvaloy RET (%1.6) katkısı ve Polifosforik asit (PPA) (%0.2) ile modifiye edilmiş Polimer Modifiye Bitüm (PMB) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında belirlenen gradasyon sabit tutularak %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 bitüm oranlarında ve %0.35 selülozik fiber katkısı ile 15 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı (OBO) belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada mastik asfalt karışımında %0 fiber (NF) oranına sahip numuneler ile beraber selülozik fiber yerine farklı oranlarda (%0.15, %0.25, %0.35, %0.45) atık kağıt lifler kullanılarak %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 bitüm oranlarında TMA numuneler hazırlanmış ve her bir seri için Marshall BSK dizayn yöntemi kullanılarak optimum bitüm oranları belirlenmiştir. Her bir seri için belirlenen OBO’nda hazırlanan numuneler üzerinde dolaylı çekme mukavemeti, nem hasarı deneyi, bitüm süzülme deneyi (Schellenberg) ve yüzey dokusu (kum yama) deneyi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde genel olarak yol üstyapısı, TMA karışımların genel yapısı, özellikleri, kullanım alanları ve TMA’da kullanılan malzemeler ele alınmıştır.

İkinci bölüm olan kaynak özetleri bölümünde TMA karışımlar konusunda daha önce yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde TMA’nın genel yapısı, özellikleri, tasarım yöntemleri, avantaj ve dezavantajları, üretim ve depolanması, TMA’da elyaf kullanımı ve kullanılan elyaf çeşitleri incelenmiştir.

Yine bu bölümün devamında; kağıt atık bölümünde ise atık kağıt hakkında genel bilgiler, atık kağıtların geri kazanımı, kullanım alanları ile atık kâğıtların sınıflandırılması ve son olarak kağıt bardak konuları değerlendirilmiştir.

Materyal ve Metot bölümü olan 3. bölümde çalışmada kullanılan fiber ve katkı malzemelerinin, agreganın, asfalt çimentosunun (bitümün), deney aletlerinin özellikleri ile çalışmada gerçekleştirilen bitüm modifikasyonu ve deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

Tartışma ve bulguların kısmının yer aldığı 4. bölümde çalışmada gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre AKB'nin TMA kaplamalarda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Son bölüm olan 5. bölümde agrega, bitüm ve karışım deneylerinde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bitümlü sıcak karışım (BSK), asfalt ve agreganın farklı oranlarda birleşiminden meydana gelir. Agregası, kaplama yapısının ana bileşeni olarak işlev görürken, bitüm ise karışımı birbirine bağlayan madde olarak rol alır. BSK'nın toplam hacminin yaklaşık %90'ı, iri ve ince yapılı mineral agregalardan oluşur. Kaplamaların işlevselliği üzerinde en belirleyici etmenlerden biri, agreganın özellikleridir (Morova, 2013).

Asfalt kaplamalar, diğer yapı türlerinde olduğu gibi, trafik yükü ve çevresel faktörler nedeniyle zamanla hasar görür. Eğer BSK'da kullanılan agregaların ve asfaltın kalitesi düşükse, bu durum asfalt kaplamaların ömrünü önemli ölçüde kısaltabilir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, asfalt karışımlarının performansını artırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanılmasını hedeflemektedir. Araştırmacılar, asfalt veya asfalt karışımlarına farklı katkıları ekleyerek, bu karışımların dayanıklılık ve stabilite gibi özelliklerini iyileştirerek, kaplamaların kullanım ömrünü uzatmaya çalışmaktadır (Mawat ve Ismael, 2020).

Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımı, çivili kar lastiklerinin yol açtığı plastik deformasyonları engellemek amacıyla ilk kez 1968 yılında Almanya'da geliştirilmiştir. Almanya'daki araştırmalara göre, TMA karışımları, BSK karışımlarına kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı daha iyi bir performans göstermektedir. Şu anda, TMA karışımları dünya genelinde yaygın olarak kullanılmakta ve çeşitli yol şartnamelerinde yer almaktadır (Saedi, 2019).

TMA kaplama tasarımında kullanılan agreganın yaklaşık %70-80'i iri agregalardan, %8-12'si filler, %5-7'si bağlayıcı ve %0.3-0.5'i ise fiberlerden oluşmaktadır. Yüksek bağlayıcı oranı ve boşluklu yapısından dolayı, asfalt üretimi, taşınması ve serilmesi sırasında bitüm, agregalardan süzülme eğilimindedir. Bu süzülme, istenmeyen bir durumdur. Bu sorunu engellemek amacıyla selüloz elyafı, mineral elyaf veya polimerler kullanılmaktadır. Genellikle selüloz ve mineral esaslı elyaflar, süzülmeyi azaltmak için tercih edilmektedir. Ancak, geleneksel elyaflar genellikle pahalı olduğu için kaplama maliyetlerini artırmaktadır. Literatürde, yaygın kullanılan katkı

maddeleri yerine daha düşük maliyetli elyafların kullanımıyla ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların özeti aşağıda sunulmuştur (Özdaş, 2021).

Naser vd. (2023), çalışmalarında atık kağıt lifleri ve çimento fırın tozunu (CKD) TMA karışımlarında stabilizatör olarak kullanmayı amaçlamışlardır. Atık kağıt ve CKD'yi, mastik asfalt karışımlarında %0.2 ila %1 oranlarında kullanmışlardır. Çalışmalarının sonraki aşamasında, hava boşlukları, yoğunluk, boşaltma özellikleri, Dolaylı Çekme Dayanımı (ITS) ve Marshall Stabilesi gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, boşaltma testinde hacimsel parametrelerde, özellikle yoğunluk ve hava boşluklarında iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca, Marshall Stabilesinde %33'lük bir artış ve ITS değerlerinde %37'lik bir iyileşme kaydedilmiştir. Eş zamanlı olarak, Marshall akma, Çekme Dayanımı Oranı (TSR) ve kayma direncinde de ek iyileşmeler gözlemlenmiştir. Genel olarak, bu çalışma, atık kâğıdın uygun şekilde işlenip CKD ile birleştirildiğinde, TMA karışımlarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve üstün hacimsel ile mekanik özelliklere sahip karışımlar elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Kordi ve Shafabakhsh (2017), yaptıkları çalışmada, TMA karışımlarının mekanik özelliklerine farklı Nano Fe_2O_3 oranlarının eklenmesinin etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Sonuçlara göre, Nano Fe_2O_3 , TMA'nın mekanik özelliklerini kabul edilebilir seviyelere kadar iyileştirebilmektedir. Bu iyileşme, nanomalzeme kullanımının karışımın rijitlik modülünü artırması ve karışımın yorulmaya karşı direncini güçlendirmesiyle gerçekleşmiştir. Ayrıca, Nano Fe_2O_3 eklemenin, sıcak karışım asfaltın tekerlek izlerine karşı mukavemetini de artırdığı belirtilmiştir.

Gunka vd. (2023), çalışmalarında atık kağıt çamuru külü ve kireçtaşı mineral tozunu kimyasal aktivasyona tabi tutmuşlardır. Bu malzemelerin ıslatma özelliklerini birincil ve nötralize asit katranı aracılığıyla araştırmışlardır. TMA numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, farklı dolgu agregası çeşitleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmalarında, asit katranıyla aktive edilmiş kireçtaşı mineral tozu ve atık kağıt çamuru külünün taş mastik asfalt içerisinde olası kimyasal dönüşümleri gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, endüstriyel atık kağıt çamuru külünün, geleneksel kireçtaşı mineral tozunun yerine kullanılabileceğini ve dolgu maddesi agregalarının asit katranı ile aktive edilmesinin etkinliğini doğrulamışlardır. Ayrıca, asit katranının

nötralizasyon gerektirmediği, çünkü taş mastik asfaltın, asit katranı nötralizasyonuna kıyasla daha iyi özellikler gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, atık kağıt çamuru külünün TMA dolgu maddesi agregası olarak kullanılabileceği ve %5 ağırlıkça asit katranı ile aktive edilmesinin, TMA'nın özelliklerini iyileştirebileceği ifade edilmiştir.

Zakerzadeh vd. (2024), son yıllarda Kırıntı Kauçuk-Taş Mastik Asfalt (KK-TMA) karışımlarının üstün performansları nedeniyle önemli bir ilgi gördüğünü belirtmişlerdir. Ancak, KK-TMA'nın saha uygulamalarında büyük ölçekli kullanımı için fizibilitesinin daha fazla araştırılmasının gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmaları, KK-TMA'nın karışım tasarım uygulamalarını incelemeyi, performans özelliklerini değerlendirerek iyileştirme potansiyeli taşıyan alanları belirlemeyi amaçlamaktadır. Agregada gradasyonu, sıkıştırma yöntemleri, işleme sıcaklıkları, KK tane boyutları ve konsantrasyonları, bağlayıcı içeriği gibi çeşitli faktörlere ilişkin eksiklikler bu çalışmada tanımlanmış ve tartışılmıştır. Ayrıca, KK-TMA karışımlarının temel performans özellikleri, bağlayıcı drenajı, nem hassasiyeti, kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaması gibi faktörler gözden geçirilmiştir.

Yadykina vd. (2015), TMA'nın yapısal oluşum süreçlerinin ve dolayısıyla fiziksel ve mekanik performansının, bitümle etkileşen dengeleyici katkı maddeleri yüzeyinden önemli ölçüde etkilendiğini öne sürmüşlerdir. Teorik ve deneysel olarak, poliamid elyafının kimyasal yapısı nedeniyle organik bağlayıcıyla yüksek reaktiviteye sahip olduğu ve bunun TMA kalitesi üzerinde olumlu bir etki yarattığı vurgulanmıştır. Ayrıca, granül dengeleyici katkı maddelerinin üretiminde kağıt hamuru ve kağıt atıklarının hammadde olarak kullanıldığında, bu materyallerin kökeninin dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir. Çalışma, kartondan üretilen katkı maddesinin bitüm yüzeyinde daha iyi tutunduğunu ve bunun sonucunda TMA'nın diğer selülozik kaynaklarla karşılaştırıldığında daha yüksek performans gösterdiğini belirtmiştir.

Ahmadinia vd. (2011), PMA karışımlarının yollar için nispeten pahalı olduğunu, ancak bu yapıların maliyetini azaltmanın ve daha verimli hale getirmenin bir yolunun ucuz polimerler, özellikle de atık polimerler kullanmak olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmalarının ana hedefi, atık plastik şişelerin (Polietilen Tereftalat - PET) TMA karışımının mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Çalışmada, farklı

PET yüzdeleri (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) içeren asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özellikleri laboratuvar testleriyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, bitümün ağırlığının %6'sı kadar PET ilavesinin en uygun olduğunu göstermiştir. Veriler, istatistiksel olarak iki faktörlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş ve belirli güven aralıklarında anlamlılık tespit edilmiştir. Ayrıca, PET ile modifiye edilmiş asfalt karışımları üzerine yapılan diğer çalışmalara da bu makalede yer verilmiştir. PET ilavesinin TMA'nın özellikleri üzerinde önemli ölçüde olumlu bir etkisi olduğu ve atık malzemelerin endüstriyel kullanımlarında çevre dostu ve ekonomik bir alternatif sunduğu belirtilmiştir.

Rahman ve Mohajeran (2020), TMA karışımlarında bitümle kapsüllenmiş sigara izmaritlerinin (CB) geri dönüşümünü araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, atık CB'ler işlenerek, kaba agregaların %1, %2 ve %3 (ağırlıkça) oranında bitüm kapsüllü CB'lerle değiştirilmiş ve bu şekilde TMA karışımları hazırlanmıştır. Çalışmada, Marshall kararlılığı, akış, esneklik modülü ve hacimsel özellikler gibi parametreler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, CB kullanılmadan hazırlanan TMA kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, bitüm kapsüllü CB'lerin TMA numunelerinde kalıcı deformasyona karşı kararlılığı ve direnci artırdığını göstermektedir. Bu umut verici sonuçlar, endüstriyel ölçekte asfalt betonlarında sigara izmaritlerinin geri dönüşümü için daha fazla araştırma yapılmasını ve uygulama prosedürlerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir.

Rodríguez vd. (2024), Peru tekstil endüstrisinde atık pamuk liflerini kullanarak üretilen TMA karışımlarının performansını değerlendirerek çevre kirliliğine katkı sağlayan bu sektörü incelemişlerdir. Çalışmada, %0.30 ticari lif ve %6 asfalt içeren bir referans TMA karışımı oluşturulmuş ve ardından bu lif aynı oranlarda tekstil lifi ile değiştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda, %0.20 oranında tekstil lifinin hacimsel gereksinimleri ve bağlayıcı drenaj testlerini en iyi şekilde karşıladığı bulunmuştur. Performans testleri, tekstil lifinin %95 TSR değerine ulaştığını, ticari lif içinse bu oranın %82 olduğunu, ayrıca iz direnç testinde tekstil lifinin 2.82 mm, ticari lifin ise 2.46 mm olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tekstil lifi yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir dinamik modül göstermiştir. Sonuç olarak, atık pamuk liflerinin TMA karışımlarında ticari liflerin yerine etkili bir şekilde kullanılabileceği ve en uygun miktarın %0.20 olduğu belirtilmiştir.

Ameli vd. (2020), TMA karışımlarında kullanılan geleneksel kireçtaşı filler malzemesi yerine farklı kütle oranlarında (%0, %25, %50, %75 ve %100) kömür atık külü (CWA) ve pirinç kabuğu külü (RHA) içeren karışımlar hazırlayarak, bu malzemelerin TMA karışımının performansına etkisini değerlendirmişlerdir. Bu doğrultuda, asfalt mastiklerinin iz ve yorulma performansını incelemek için Çoklu Gerilim Sürünme Kurtarma (MSCR) ve doğrusal Genlik Tarama (LAS) testleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, karışımların mekanik performansını araştırmak için Marshall, esneklik modülü, nem duyarlılığı, tekerlek izi, dolaylı çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. MSCR test sonuçları, orijinal bağlayıcıya RHA eklemenin bağlayıcının gerilmesinde azalmaya yol açtığını ve böylece iz dayanımının her iki gerilim seviyesinde de arttığını göstermiştir. CWA katkısının RHA ile karşılaştırıldığında daha olumsuz bir etkisi olduğu belirtilmiştir. LAS testlerinden elde edilen sonuçlar, RHA eklemesinin bağlayıcının yorulma ömrünü artırdığı yönündedir. Sonuç olarak, çalışmada RHA'nın geleneksel dolgu maddesiyle değiştirilmesinin asfalt karışımlarının Marshall stabilitesini, esneklik modülünü, iz bırakma özelliklerini, nem direncini ve çekme mukavemetini artırdığı ifade edilmiştir.

Arshad vd. (2019), TMA karışımlarının nem duyarlılığı, sertlik ve tekerlek izi direncini artırmak amacıyla nanosilika kullanarak bitüm modifikasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, 50/70 penetrasyon dereceli bitüm, %2 oranında nanosilika ile modifiye edilmiştir. Daha sonra, TMA numunelerinin performansı nem duyarlılığı, sertlik ve tekerlek izi direnci açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, nanosilika eklemesinin esneklik modülünü artırdığını, taş mastik asfalt karışımlarının iz derinliğini azalttığını ve yeterli nem direncini sağladığını göstermektedir.

Öner ve Özdaş (2022), TMA karışımlarındaki agregalar arası boşluk oranının yüksek olmasının, bitümün agregalardan süzülmesine yol açtığını ve bu süzülmeleri engellemek için kullanılan geleneksel elyafların (mineral, selüloz) maliyetinin yüksek olduğunu, bunun da kaplama maliyetlerini artırdığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, selüloz elyaf yerine tekstil fabrikalarından atık olarak çıkan tekstil atıklarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Farklı oranlarda tekstil atığı ve selüloz elyafı içeren numuneler üzerinde Marshall testi, Schellenberg bitüm süzülme testi ve Kum Yama testi yapılmış ve sonuçlar, geleneksel elyaf yerine tekstil atıklarının TMA karışımlarında kullanılabileceğini göstermiştir.

Rasekh vd. (2022), TMA kaplamalarda katkı maddesi olarak mineral elyaf grubundan bazalt elyaflarının kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Deneylerinde, farklı boyutlardaki bazalt elyaflarını tek başına ve TMA karışımlarında yaygın olarak kullanılan selülozik elyaflarla karıştırarak bitümün süzülme performansını ve tekerlek izi performansındaki değişiklikleri araştırmışlardır. 19 farklı numune üzerinde yapılan Schellenberger süzülme deneyleri, tüm numunelerin karayolları teknik şartnamelerine (KGM) uygun olduğunu göstermiştir. Optimum bitüm oranlarıyla hazırladıkları numunelere Hamburg Tekerlek İzi testi uygulanmış ve en yüksek tekerlek izi deformasyonunun %0.2 oranında 12 mm'lik bazalt elyaf içeren numunelerde, en düşük deformasyonun ise %0.3 oranında 12 mm'lik bazalt elyaf ve %0.2 oranında selüloz elyaf içeren numunelerde ölçüldüğü belirtilmiştir.

İzol ve Sarıışık (2022), TMA karışımlarına mineral filler olarak atık mermer tozu ekleyerek, Marshall tasarım prosedürü ile oluşturulan karışımların performansını karşılaştırmışlardır. Çalışmada, alternatif filler malzemesi olarak kalker ve atık mermer tozu kullanılmış, ayrıca bazalt malzemesi, kaba ve ince agregalar ile kontrol filler olarak değerlendirilmiştir. Agregaların kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için, gradasyon eğrisine uygun oranlarda bitüm kullanılarak Marshall stabilite testi yapılmıştır. Çalışmada toplamda 45 numune dökülmüş ve her bitüm yüzdesi için üç numune oluşturulmuştur. Optimum bitüm yüzdesi belirlendikten sonra, bazalt, kalker ve mermer filler malzemelerinin kullanıldığı numuneler, Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar, diğer malzemelerle benzer performanslar göstererek, mermer tozunun taş mastik asfaltlarda alternatif filler malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kabadayı (2019), TMA kaplamalarda agrega ve filler olarak kullanılan bazalt filler malzemesi yerine üleksit kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, üleksit filler malzemesi farklı oranlarda TMA karışımına eklenmiş ve Marshall prosedürüne göre hazırlanan numunelere Marshall stabilite ve dolaylı çekme deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar, TMA karışımlarında üleksit kullanımıyla Marshall stabilitesi ve esneklik modülü değerlerinde artış gözlemlendiğini göstermiştir.

Evirgen vd. (2021), ağır trafik yükleri nedeniyle meydana gelen bozulmaların, özellikle tekerlek izi nedeniyle oluşan ondülasyon bozulmalarının, TMA kaplamaların

tercih edilmesinin önemli sebeplerinden biri olduğunu vurgulamışlardır. TMA karışımlarında yüksek oranda agrega kilitlenmesi ve etkileşimi ile bitüm oranının fazla olduğunu belirten yazarlar, uygulamada genellikle polimer modifiye bitüm veya asfalt modifikasyonuna uğramış selülozik fiber katkılarının tercih edildiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, bitüm modifikasyonunun iki aşamalı olmasının aksine, cam ve polipropilen elyafların doğrudan kuru karışıma eklenerek karışım modifikasyonunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. "Superpave" tasarım yöntemi ile yapılan çalışmada toplam 169 numune hazırlanmış ve numunelere %0.1 ile %0.8 arasında cam ve polipropilen elyaf eklenmiştir. %0.6 ile %0.8 arasında cam ve polipropilen elyaf katkılı deney sonuçlarına göre, süzülme direnci, esneklik modülü ve su hassasiyeti içeren dolaylı çekme dayanımı değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Kaşak (2007), TMA karışımlarında diatomit katkısının uygulanabilirliğini ve ülke ekonomisine sağlayabileceği yararları araştırmıştır. Çalışmada, Marshall dizayn deneyleri, plastik deformasyonlara karşı davranışı belirleyen tekerlek izi oturma tayini (Rutting) deneyleri, karışımların tekrarlı yük altında yorulmaya karşı direnç dayanımını ölçen yorulma (Fatigue) deneyleri ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sayesinde, diatomitin TMA karışımlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve diatomit katkısının asfalt karışımlarındaki mekanik ve dayanım özelliklerine olan etkisi değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Saedi (2019), FRP (Fiber Reinforced Polymers) katkı maddesinin SBS (Stiren-Butadien-Stiren) ve Viatop Premium katkı maddeleriyle birlikte TMA karışımlarının performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, asfalt bağlayıcı %5 oranında SBS ile modifiye edilmiştir ve ardından %0.3 oranında Viatop Premium eklenmiştir. Sonrasında, değişik oranlarda (%0.3, %0.5, %0.7 ve %0.9) FRP katkı maddesi karışıma dahil edilmiştir. Modifiye edilmiş bitümle yapılan Marshall Dizaynı'na göre hazırlanan karışımların mekanik özellikleri, Marshall Stabilité, Akma, Su Hasarı, Statik Sünme, Tekrarlı Sünme, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Bitüm Süzülme ve Yorulma testleriyle değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, FRP katkısının, SBS ve Viatop Premium katkılarıyla modifiye edilen TMA karışımının performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle, tekerlek izi direnci, yaşlanma direnci, esneklik, adezyon, yük yayma kapasitesi ve yorulma ömrü artarken, yüksek sıcaklık hassasiyeti düşmüş ve düşük sıcaklıklarda çatlama eğilimi azalmıştır.

Çalışmada, TMA karışımının performansını en yüksek düzeyde iyileştiren FRP katkı oranının %0.7 olduğu tespit edilmiştir.

Aslan (2018) çalışmasında, TMA üretiminde pomza, Ahlat taşı ve perlitin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, bu malzemelere Los Angeles aşınma testi uygulanarak aşınma kaybı oranları belirlenmiştir. Sonuçlar; pomzanın aşınma kaybı oranı %73, Ahlat taşının %78 ve perlitin %67 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, pomza, Ahlat taşı ve perlitin TMA üretiminde iri agrega olarak kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır.

İkinci aşamada ise, pomza, Ahlat taşı ve perlitin filler (dolgu malzemesi) olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu aşamada dört farklı TMA karışımı üretilmiştir:

1. Bazalt-TMA: Karışımında iri agrega, ince agrega ve filler olarak bazalt kullanılmıştır.
2. Pomza-TMA: Karışımında iri ve ince agrega olarak bazalt, filler olarak pomza kullanılmıştır.
3. Ahlat taşı-TMA: Karışımında iri ve ince agrega olarak bazalt, filler olarak Ahlat taşı kullanılmıştır.
4. Perlit-TMA: Karışımında iri ve ince agrega olarak bazalt, filler olarak perlit kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, bu dolgu malzemelerinin TMA karışımlarındaki performanslarını değerlendirerek, hangi malzemelerin TMA üretiminde filler olarak daha uygun olduğunu belirlemektir.

Aslan (2020) çalışmasında, kenevir bitkisinden elde edilen liflerin TMA karışımlarındaki bitüm süzülme performansını araştırmayı hedeflemiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, farklı bitüm oranları (%5.0, %5.5, %6.0, %6.5, %7.0, %7.5) ile 18 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Ayrıca, fiber katkılarının asfaltın süzülmesine etkisini incelemek amacıyla, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında kenevir lifi içeren ve fiber içermeyen referans karışımlarına Schellenberger süzülme deneyleri uygulanmıştır. Kenevir lifi boyunun TMA karışımlarının özelliklerine etkisini araştırmak için farklı boyutlarda kesilmiş kenevir lifleri (2 mm, 3 mm, 6 mm,

12 mm) kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca, kenevir lifi karışım oranının TMA karışımlarının özelliklerine etkisi incelenmiş ve katkısız, %1, %3 ve %4 oranlarında fiber katkılı TMA numuneleri hazırlanmıştır. Marshall tasarım metodu ile hazırlanan numunelerde, Dp (Hacim Özgöl Ağırlık), Vh (Hava Boşluğu), VMA (Agrega Boşluk Oranı), Vf (Bitüm ile Dolu Boşluk Oranı), MS (Marshall Stabilitesi) ve Akma değerleri belirlenmiştir. Doğal kenevir lifi içeren TMA karışımları, aynı özellikteki selülozik fiber içeren numunelerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, %1, %2 ve %3 oranlarında doğal kenevir lifinin süzülme performansı açısından selülozik fibere kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Çevrim (2021), çalışmada atık deniz kabuğu agregalarının TMA karışımlarında bazalt agregası yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, atık deniz kabukları kırılarak, doğal bazalt agregası yerine aynı gradasyonla orantılı olarak %5 oranında ilave edilmiştir. Deniz kabuğu agregalarının maksimum boyutları 0.425 mm, 0.180 mm ve 0.075 mm olarak değiştirilerek farklı seçenekler oluşturulmuştur. Ayrıca, deniz kabuğu filleri bazalt agregasına üç farklı yöntemle (kuru yöntem, nemli yöntem, hamur yöntemi) eklenerek, katılma yöntemlerinin etkisi de araştırılmıştır. Taş mastik asfalt karışımları Marshall yöntemi ile tasarlanmış ve bu karışımlara Modifiye Lottman, dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilite, Hamburg tekerlek izi ve tekrarlı yük sünme testleri uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, deniz kabuğu agregası kullanımının TMA karışımlarının stabilitesini, düşük sıcaklıkta çatlama direncini, su hasarı direncini ve deformasyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, deniz kabuğu agregası boyutunun küçülmesiyle karışımın mekanik özelliklerinde iyileşmenin arttığı ve en iyi özelliklerin filler boyutunda eklenmesiyle sağlandığı anlaşılmıştır. Filler katılma yöntemleri açısından değerlendirildiğinde ise, nemli agregaya yöntemi hamur ve kuru agregaya yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu çalışma, deniz kabuğu agregalarının, özellikle çevresel açıdan önemli bir atık malzeme olarak, taş mastik asfalt karışımlarında kullanılabileceğini ve karışım performansını iyileştirebileceğini göstermektedir.

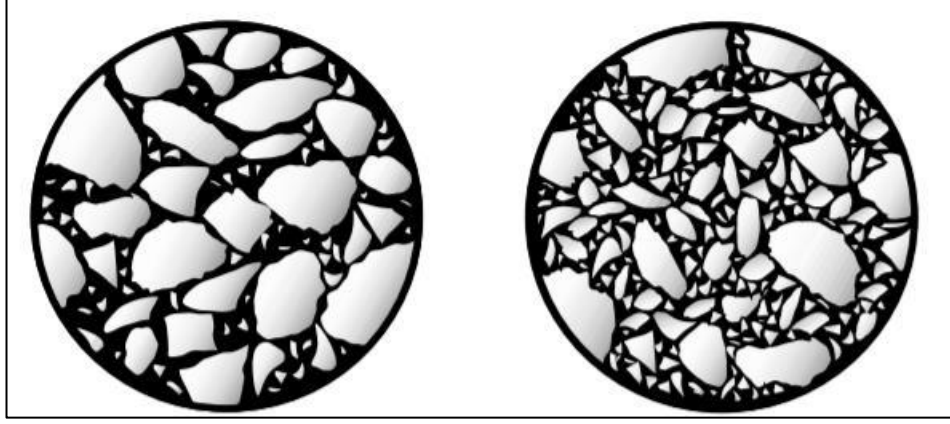
2.1. Taş Mastik Asfalt (TMA) Karışımlar

2.1.1. Taş mastik asfalt karışımlar ve tarihçesi

Bilim insanları, artan trafik hacimlerinin neden olduğu asfalt kaplamaların hızlı bir şekilde bozulmasını önlemek amacıyla bitümlü karışımların performans özelliklerini iyileştirmek için yenilikçi yöntemler ve yapılar belirlemişlerdir. TMA, iri agregaların ve yüksek bitüm oranının oluşturduğu özel bir karışımdır. Bu karışımda %70-80 oranında iri agrega, %6-7 bağlayıcı (bitüm), %8-12 dolgu maddesi (filler) ve yaklaşık %0.3-0.5 oranında elyaf bulunur. TMA'da agregalar arasındaki boşluklar, ince agregalar, filler ve polimer modifiye bitüm gibi materyallerle doldurulur. Bu boşluklar, trafik yüklerini taşıyan kaba agregalar tarafından oluşturulurken, mastik harç (ince agrega ve filler) bu boşlukları doldurur ve karışıma yüksek dayanıklılık sağlar.

TMA'nın en önemli avantajlarından biri, iri agregaların karışımda yoğun olması nedeniyle trafik yüklerini taşımada üstün performans sergilemesidir. Ancak, bitüm oranının yüksek olması nedeniyle, karışımdan bitüm ve bitüm+fillerin süzülmesi problemi ortaya çıkmaktadır. Bu sorunu önlemek için, karışıma fiber ilavesi yapılır. Fiberler, bitümün süzülmesini engeller ve karışımın dayanıklılığını artırır (Kaşak, 2007).

TMA'nın bu yapısal özellikleri ve eklenen fiberlerin etkisi ile asfalt kaplamaların performansını artırarak, özellikle ağır trafik yüklerine karşı dayanıklılığını ve uzun ömürlü olmasını sağlamak hedeflenmektedir. TMA ve HMA (Bitümlü Sıcak Karışım) arasındaki farklar ve performans özellikleri, Şekil 2.1'de gösterilen yüzey görünümleri ile daha net bir şekilde ortaya konulabilir.



Şekil 2.1. TMA ve HMA'nın yüzey görünümüleri (Aslan, 2020)

TMA (Taş Mastik Asfalt), 1960'lı yılların sonlarında Almanya'da, özellikle çivili kar lastiklerinin asfalt kaplamalarda oluşturduğu kalıcı deformasyonları önlemek amacıyla geliştirilmeye başlanmış bir Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) tipidir. TMA'nın ilk kez Almanya'da geliştirilmesinin ardından, Fransa, Hollanda, İsveç ve İsviçre gibi ülkelerde de kullanımı yaygınlaşmıştır.

TMA'nın popülerliği, özellikle Avrupa'da, artan ağır taşıt trafiği, yüksek dingil yükleri ve kaplamalarda oluşan tekerlek izi nedeniyle meydana gelen oluklanmalar gibi bozulmaların önlenmesi ihtiyacından kaynaklanmıştır. 1975 yılında Avrupa'nın büyük bir kısmında çivili lastiklerin yasaklanmasıyla TMA kullanımına bir süre ara verilmiş olsa da, ağır taşıt trafiğinin etkisiyle oluşan yol bozulmalarının arttığı 1980'li yıllarda TMA kullanımı yeniden yaygınlaşmış ve Almanya'da 1984 yılı itibarıyla teknik şartnamelere dahil edilmiştir (Harris ve Stuart, 1995).

TMA'nın bu dönemde tekrar popüler hale gelmesi, asfalt kaplamaların dayanıklılığını artırmak ve trafik yüklerinin yol üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek amacıyla sağladığı avantajlardan kaynaklanmaktadır. TMA, bu sayede asfalt kaplamaların ömrünü uzatırken, trafik yüklerine karşı dirençli hale gelmesini sağlar.

TMA (Taş Mastik Asfalt), Avrupa'da hızlı bir şekilde yayılmaya başlamıştır. 1974 yılında İsveç'te, EAPA (European Asphalt Pavement Association) tarafından bazı yol kesimlerinde kullanılmaya başlanmış ve elde edilen olumlu sonuçlarla beraber birçok Avrupa ülkesinde TMA kullanımı artmıştır. İsveç'te ilk kez 1974 yılında kullanılan

TMA, 1988 yılından itibaren standart aşınma tabakası olarak kabul edilmiştir (Brown vd., 1997; Aslan, 2018).

TMA'nın Avrupa'daki yaygınlaşması, yüksek trafik hacmine sahip yollarda, havaalanlarında ve endüstriyel alanlarda daha dayanıklı ve uzun ömürlü kaplama ihtiyaçlarının artmasıyla hız kazanmıştır. Danimarka'da 1983'te, Macaristan'da 1985'te, Norveç'te 1987'de, Hollanda'da 1991'de, İtalya ve Çek Cumhuriyeti'nde 1991'de, Portekiz'de ise 1994'te TMA kullanılmaya başlanmıştır (Arslan, 2014; Aslan, 2018).

EAPA'nın 2010 verilerine göre, Avrupa'da TMA kullanımında lider ülkeler sırasıyla Danimarka, Lüksemburg, İsveç, Belçika, Almanya, İzlanda ve Hollanda'dır. Günümüzde ise tüm Avrupa ülkelerinde TMA kullanımı yaygınlaşmıştır (Aslan, 2018). Bu yaygınlık, TMA'nın yüksek trafik yüklerine ve zorlu hava koşullarına karşı gösterdiği dayanıklılıkla doğru orantılı olarak artmıştır.

TMA kaplamaların yüksek arazi ve laboratuvar performansları, ağır trafik yüklerine karşı gösterdiği dayanıklılık, Türkiye'de de yaygınlaşmasına yol açmıştır. Özellikle ağır trafik hacmi olan kesimlerde, otoyollar ve kavşaklar gibi bölgelerde TMA, aşınma tabakası olarak tercih edilmektedir. TMA karışımlarının, trafik yükleri ve zorlu hava koşullarına karşı üstün performansı, bu tür uygulamaların artmasına olanak sağlamıştır (Aslan, 2020).

Türkiye'de esnek üstyapılarda meydana gelen bozulma ve deformasyonları azaltmak amacıyla, üstyapı aşınma tabakasının tasarımında agrega gradasyonu kabalaştırılmış ve kısa sürede TMA dizaynına geçilmiştir (Saedi, 2019). Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), Alman TMA Şartnamesi'nden faydalanarak 1997 yılında Türkiye'deki ilk TMA Şartnamesini yayımlamış ve 1998 yılında inşaat çalışmalarına başlanmıştır. 1999 yılında ise ilk TMA uygulamaları, Ankara-Polatlı-Sivrihisar Yolu ve Bala Ayrımı-Kulu Ayrımı Devlet Yolu kesimlerinde gerçekleştirilmiştir (Çevrim, 2021). Günümüzde ise TMA ile ilgili yapım ve üretim şartları, 2013 yılında oluşturulan Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) kapsamında 408. k ısımda yer almaktadır (Aslan, 2018).

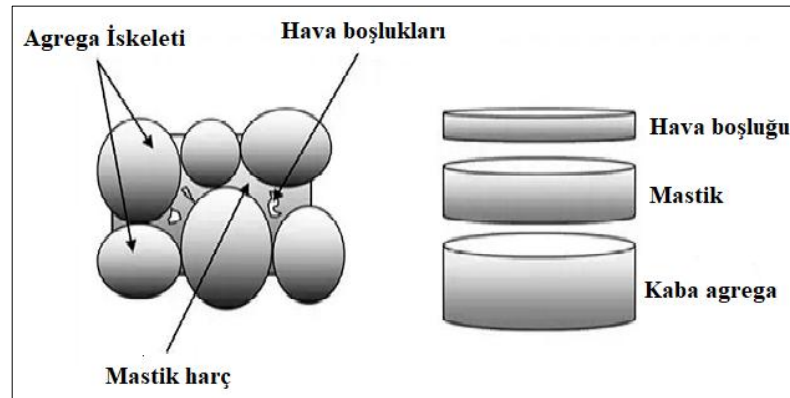
Türkiye'de, KGM'nin yanı sıra İSFALT (İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.) de 2003 yılında TMA üretimine başlamıştır. İSFALT, ilk olarak Küçükçekmece Çobançeşme Kavşağı (Havaalanı Kavşağı) ve Bakırköy Ataköy Kavşağını inşa etmiştir. Ardından, 2007 yılında Metrobüs hattı Avcılar-Cevizlibağ kesimini, 2008 yılında Metrobüs hattı Cevizlibağ-Zincirlikuyu arası ile Vatan Caddesi ve Millet Caddesini, 2009 yılında ise Zincirlikuyu-Söğütözü arasında inşaat ederek, Türkiye'deki TMA üretiminin yaygınlaşmasına büyük katkı sağlamıştır. Bugün Türkiye, Avrupa ülkeleri arasında TMA üretimi açısından 11. sırada yer almaktadır (Arslan, 2014; Şanlıer, 2018; İzol, 2020; Özdaş, 2021).

2.1.2. Taş mastik asfalt yapısı

TMA'nın içeriği aşağıdaki gibidir (Şekil 2.2)

- Kaba agrega iskeleti
- Mastik (yani bağlayıcı, dolgu maddesi, ince agrega ve stabilizatör)
- Asfalt karışımındaki boşluklar (Blazejowski, 2016)

TMA kaplama tasarımının içeriğinde agrega ağırlığının %70-80'i iri agrega, %8-12 filler, %5-7 bağlayıcı ve yaklaşık %0.3-0.5 fiber kullanılmaktadır (Özdaş, 2021).



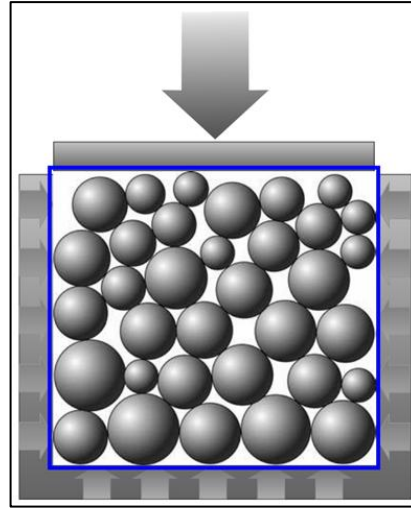
Şekil 2.2. TMA'nın temel bileşenlerine bölünmesi (Şanlıer, 2018)

Bir karışımın agrega iskeleti kavramı oldukça geniş bir anlama sahiptir. Bunlar, kum karışımından, iri agrega parçacıklarının hacmin giderek daha önemli bir bölümünü kapladığı karışımlara ve tamamen iri agregalardan oluşan bir karışıma kadar uzanır. Sürekli bir matris oluşturan ve yük taşıyan bir bileşen oluşturan agrega türleri, belirli grup sıralamasını belirler. Çoğunlukla 2 mm'ye (veya Amerika Birleşik Devletleri'nde

2.36 mm'ye) kadar boyutlarda bir agregadan oluşan karışımlar (örneğin, kum asfalt) nadiren uygulanırken, kum-iri agrega karışımları mastik asfalttan asfalt betona kadar bir süreklilik içindedir. TMA, gözenekli asfaltlı iri agrega-kum grubuna aittir ve bu, düz iri agrega türüne en yakın türdür. Sadece iri agregalar içeren mineral karışımları, şu anda nadiren kullanılan kaplamalı makadamlar oluşturur (Blazejowski, 2016).

Daha güçlü mineral iskeletlere sahip karışımlar geliştirmenin nedeni elbette daha ağır trafik nedeniyle. Sadece aks yükleri ve trafik hacimleri sürekli olarak artmakla kalmamış, aynı zamanda araçlar ve araç lastiklerinin yapıları da değiştirmiştir. Örneğin, süper tek teker lastiklerin artan popüleritesi, kaplamalara uygulanan gerilim seviyesini değiştirmiştir. Açıkçası, tüm bu faktörler asfalt karışımları için gereklilikleri artırmaktadır (Blazejowski, 2016).

TMA mineral iskelet yapısını sunmak için iyi bilinen bir örnek kullanılabilir. Bir kaba birkaç tane koyulup (Şekil 2.3), sıkıştırılıp ve sonra yükleme yapıldığında, agreganın parçalanma (ezilme) direncine bağlı olarak yüksek basınç dayanımına sahip bir yapı elde edilmektedir. Bu tür sıkıştırılmış iri tane koleksiyonunun ayırt edici bir özelliği, aralarındaki tam ve kesintisiz temastır. Bu tür bir agrega iskeleti, güçlü bir yapıya sahip asfalt yüzey karışımı sağlamak için arzu edilmektedir. Üzerine gelen yükün bir mineral iskelet tarafından nasıl taşındığını incelendiğinde tam tane teması olduğu varsayılarak yükün bitişik taneler tarafından kaba parçacıklar (kaba agrega) arasındaki temas noktaları aracılığıyla aktarılması görülebilmektedir. Kaba agrega parçacıkları arasındaki bu temas noktaları yoksa daha ince parçacıklar yükü taşımaya yardımcı olmak zorunda kalacak ve bu da kaba, aktif taneler tarafından süresiz bir yük aktarımının gelişmesine ve potansiyel olarak tüm yapının zayıflamasına neden olacaktır (Blazejowski, 2016).



Şekil 2.3. Yan destekli dikey yüklenmiş taneler (Blazejowski, 2016).

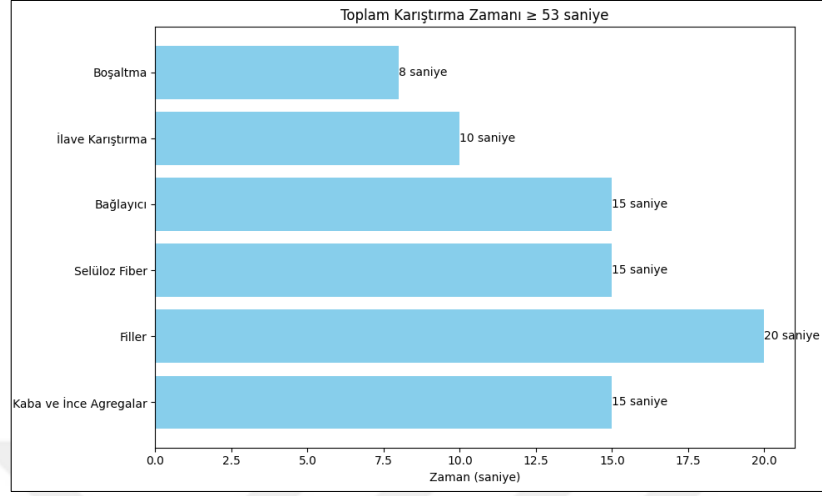
2.1.3. Taş mastik asfalt üretimi

TMA üretimi asfalt betonu gibi üretilmektedir. Kaba agreganın yüksek oranda kullanımından dolayı iki ön dozaj silosu kullanılması gerekebilir. Kaba agregaların yüksek oranından dolayı, sıcak eleme üst eleklerinde darboğaz oluşup, eleme olumsuz etkilenebilir.

Kullanılan plentin dozaj ve elek kapasitesi ile amaçlanan üretim kapasitesi uyumlu olmalıdır. TMA'daki düşük orandaki ince agreg, kurutucuda (dryer), kaba agregaların etrafında kalan bir tabaka oluşturmadığından, agregalar direkt olarak ateşe maruz kalıp aşırı ısınmaktadır.

Üretim süresince, agreg ısısının istenilen düzeyde kalmasını sağlamak gerekmektedir. Önemli olan üretimi tamamlanmış karışımın ısısıdır ve 170°C dereceyi geçmemelidir. Stabilize edici katkı malzemeleri niteliklerine göre titizlikle karışıma ilave edilmelidir. Katkı malzemesinin oranı ve karışımdaki homojen dağılımı, karışımın ve dolayısıyla dökülen tabakanın kalitesini önemli derecede etkilemektedir. Katkı malzemelerin teslim edildiğindeki homojenitesi ve kalitesi depolamada ve imalat esnasında da korunmalıdır. Katkı malzemeleri demet olarak karışıma verilecekse, demetlerin boyutları mikserin kapasitesine uygun olmalıdır. Organik fiberlerin depolamada ve imalat sonrasında nem almamasına dikkat edilmelidir. Olası bir topaklanma karışımdaki homojen dağılımı etkilemektedir. Şekil 2.4'te üretici tecrübelerine dayanarak verilen öneriler görülmektedir. Kullanılan ekipmanlara göre

değişik üretim yöntemleri ve karışım zamanları daha uygun olabilir (Drüschner ve Schäfer, 2000).



Şekil 2.4. Selüloz fiberli TMA üretimi için önerilen işlemler ve karışım zamanları

TMA'nın plent üretimi için öneriler;

- Modifiye edilmiş asfalt kullanırken yaklaşık 170°C'lik (340°F) bir sıcaklık korunmalı ve asfaltın aşırı ısınmamasına dikkat edilmelidir
- Tutarlı bir şekilde plent üretim sıcaklığı sabitlenmeli ve korunmalıdır.
- Polimer modifiyeli asfalt eklemekten önce tesis, konveyörler ve diğer hareketli parçalar sıcak agrega ile önceden ısıtılmalıdır.
- Stoklar uygun şekilde korunmalı ve gelen agregaların derecesi izlenmelidir.
- Mineral dolgu, elyaf ve anti-strip madde besleme sistemleri plent üretim hızına göre kalibre edilmeli ve kilitleme sistemi korunmalıdır.
- Mineral dolgu ve elyaf kullanımı için daha uzun karıştırma sürelerinin gerekebileceğini dikkate alarak yeterli karıştırma süresini belirleyin ve koruyun.
- Segregasyon olasılığını en aza indirmek için gerektiğinde üç damla yükleme sistemi kullanılmalıdır.
- TMA karışımının depolama silosunda tutulmasına izin verilen süre en aza indirilmelidir (NAPA, 2002).

2.1.4. Taş mastik asfalt depolama, nakliye, serme ve sıkıştırma

Bütün asfalt tipleri gibi taş mastik asfaltlarda uzun süre silolarda depolanmamalıdır. Bu süreç içerisinde bağlayıcı madde zararlı derişikliklere uğrayabilir. Nakliye araçlarının yükleme rampaları temiz olmalıdır. Asfaltın rampalara yapışmasını önlemek için sadece asfalta zarar vermeyen çözücüler kullanılmalı veya ince bir su tabakası yeterlidir. Mazot kullanılması kaliteye olumsuz etkisinden ve iş emniyeti açısından yasaktır. Nakliye araçlarının üzeri asfaltın soğuması ve havadaki oksijenle birleşerek bağlayıcı madde sertleşmesini önlemek için her zaman, yaz mevsiminde dahi, rüzgâr geçirmeyen örtü ile örtülmelidir. Küçük miktarlarla veya düşük randımanla çalışmalarda (şehir içi yollarda veya tamir işlerinde) ısı izolasyonlu kamyon üstü tanklar veya yatay bantlı termo kazanlı römorklar çok uygundur (Drüschner ve Schäfer, 2000).

Uzak nakliye mesafelerinde karışım soğumaması için karışımın yüksek ısıda üretilmesi kesinlikle yanlıştır. Bağlayıcı ve karışımın nakliye ve serim esnasında ayrılma ve akması halinde bağlayıcı sertleşir ve sonuç olarak sıkıştırmada sorun yaşanır. Üretim, nakliye ve serim randımanı birbiriyle uyumlu olarak gerçekleştirilmelidir. İyi bir organizasyon ile nakliye araçlarının bekleme sürelerini ve bununla bağımlı olarak malzemenin ısı kayıplarını önleyebiliriz. Ayrıca finişer çalışmasında bekleme süreleri oluşmamalıdır. Sürekli olarak ilerleyen finişer çalışması düzenli sıkıştırma ve uygun yüzeysel yapı için ön koşuldur.

TMA'nın yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için öneriler;

- TMA'yı yerleştirirken minimum 10°C (50°F) hava sıcaklığının korunduğundan emin olunmalıdır.
- Temiz bir nakliye aracıyla başlanmalıdır.
- Sadece su bazlı sıvı sabun veya kuru sabun tozu gibi onaylı ayırma maddeleri kullanılmalıdır.
- Kamyon kasalarındaki tüm fazla ayırma maddeleri boşaltılmalıdır.

- Kamyon kasalarında brandalar kullanın ve nakliye sırasında aşırı soğumayı önlemek için kamyon kasasına güvenli bir şekilde oturduğundan emin olunmalıdır.
- Boşaltmadan sonra kamyon temizliği için alan sağlanmalıdır.
- Tutarlı karışım sıcaklığı sağlamak, ayrışmayı önlemek ve işlemin sürekliliğini iyileştirmek için bir malzeme transfer cihazı veya diğer yardımcı ekipman kullanılabilir.
- Asfaltlama işleminin sürekliliği sağlanmalıdır.
- Makinelerin başlatılma ve durdurulmaları en aza indirilmelidir.
- Helezonlar çalışır durumda tutulmalı, modifiye edilmiş asfalt kullanıldığında karışım yaklaşık 140°C (280°F) sıcaklığa ve orijinal asfalt kullanıldığında 130°C (260°F) sıcaklığa ulaşmadan önce silindirleme tamamlanmalıdır.
- Silindir sıcak mat üzerinde durdurulmamalıdır.
- Sıkıştırma derhal ve silindir finişere çok yaklaşılarak yapılmalıdır
- Lastik tekerlekli silindirler TMA sıkıştırması için uygun değildir. İstenilen yüzeysel özelliği gerçekleştiremediği için genelde kullanılmaz.
- Karışımındaki sıcaklık kaybını en aza indirmek için yerleştirme ve sıkıştırma yapılmalıdır.
- Vibrasyonlu sıkıştırma yeterli malzeme sıcaklığında ve statik bir baskıdan sonra yapılmalıdır.
- Maksimum yoğunluğa ulaşmak için gerektiği şekilde iki veya üç silindir kullanılmalıdır.
- Karışım sıcakken matı hızla yuvarlanmalıdır.
- El işini en aza indirilmelidir.
- Uygun hizalama ve sıkıştırmayı sağlamak için uzunlamasına derzlerin muayenesinde ve yapımında özel dikkat gösterilmelidir (NAPA, 2002).

2.1.5. Taş mastik asfalt uygulama alanları

Havaalanı kaplamalarının aşınma tabaklarına ilişkin gereklilikler incelendiğinde; Suya karşı geçirimsiz olmalı ve orta yolu uygun şekilde korumalıdır. Yabancı cisim hasarından (FOD) (yani gevşek parçacıklar) arındırılmış bir yüzey sağlamalıdır. Uçaklardan gelen yüklere karşı dirençli olmalıdır. Düzgün yüzeyli olmalıdır. Gerekli

kaymayı önleyici özellikleri korumalıdır. Belirli alanlarda yakıt, hidrolik ve buz çözücü sıvıların veya diğer çözücülerin dökülmesine karşı dayanıklı olmalıdır (Blazejowski, 2016).

Avrupa Asfalt Kaplama Birliği'nin (EAPA) bir raporuna göre, asfalt beton kaplamalar pistlerin çoğunda kullanılmaktadır. TMA tipi kaplamalarının yüksek performansı, havaalanı yöneticilerinin dikkatini çekmiş ve TMA teknolojisi havaalanı kaplamalarının aşınma tabakalarında uygulama şansı bulmuştur. Çeşitli havaalanlarında (Sidney, Avustralya ve Johannesburg, Güney Afrika) çok sayıda deneme yolu ortaya çıkmıştır. TMA'nın bazı önemli, daha büyük uygulamaları Almanya'nın Main kıyısındaki Frankfurt'ta ve Norveç'in Oslo yakınlarındaki Gardermoen'da görülebilmektedir (Blazejowski, 2016). TMA uygulamalarının karayolu üstyapılarında hızla yaygınlaşmasına rağmen havaalanı pistlerinde beklenen başarıya ulaşamamıştır. Bu duruma havaalanı pistinin eşsiz uygulamalar gerektirmesi ve TMA kaplamalara özel bazı sorunlar sebep olmuştur (Blazejowski, 2016; Çevrim, 2021).

Köprülerdeki yüzey kaplaması, toprak alt zemindeki standart bir kaplamada olduğu gibi değildir ve olmamalıdır. Temel fark, farklı bir çalışma modunda farklı şekilde üretilmelerinde yatmaktadır. Dikkate alınması gereken özel durumlar vardır, bunlar;

- Çelik yapının altındaki havanın, sıcaklığının değişmesi ile köprü kaplamasında oluşan ısınma ve soğuma
- Geçen araçların köprü güvertesinde neden olduğu yapısal bozulmalar.

Geleneksel yol kaplamalarından daha yüksek olan, köprü güvertesinde oluşabilen, genlik titreşimleri Buzlanma önleyici katkıların daha fazla kullanılmasından kaynaklanan kaplamada oluşan bozulmalar (Blazejowski, 2016; Çevrim, 2021).

Tüm bu nedenlerden dolayı, köprü güvertelerindeki asfalt kaplamalar toprak alt zemin eşdeğerlerinden daha hızlı bozulmaya maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, köprü kaplama tabakalarının bir kombinasyonunu tasarlanırken, aşağıdaki gibi bazı ek noktalara dikkat edilmelidir:

- Kaplama hizmet ömrünü etkileyen kritik unsur, tüm katmanların dayanıklı bir şekilde birbirine bağlanmasıdır.
- Yapı ne kadar esnekse, asfalt kaplamada o kadar elastik olmalıdır.
- Katmanların iyi sıkıştırılması dikkate alınmalıdır.

İnce TMA kaplama teknolojileri göz önüne alındığında, sadece agrega gradasyonu değil bağlayıcı miktarı ve türü de standart finişerle yaklaşık 4 cm'lik (genellikle 3 cm'den az) sıkıştırma kalınlığı elde edilmesine olanak sağlamalıdır. Bu zorluklara rağmen ince TMA ne kaplamayı gerçekten güçlendirebilmekte ne de yorulma ve yansıma çatlaklarına çare olabilmektedir. Birçok ülke 4 cm'den az kalınlık elde edebilmek için kendi teknolojilerini geliştirmiş ve genellikle, TMA gibi, kesikli gradasyon kullanılan karışımlar tercih etmişlerdir (Blazejowski, 2016; Çevrim, 2021).

-Tipik Olmayan TMA'lar özel kullanım amaçları ve farklı tekniklerle üretilen TMA türleri şu şekilde sıralanabilir (Blazejowski, 2016; Çevrim, 2021).

- Orta tabakalarda (binder tabakası) kullanılan TMA
- Sessiz TMA
- Kjellbase: %5 oranında modifiye bitümle üretilen özel tip bir TMA'dır.
- Renkli TMA

2.1.6. Taş mastik asfaltın avantaj ve dezavantajları

TMA, geleneksel yoğun dereceli asfalta göre bir dizi avantaja sahiptir; (1) Kalıcı deformasyona veya iz oluşumuna karşı direnç (%30-40 daha az kalıcı deformasyon, yoğun dereceli asfalttan). Van de Ven, vd. bir agrega iskeletinin agregadan agregaya temasının, karışımın sıcaklığa duyarlı hale gelmesini ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona maruz kalmasını önlemesi gerektiğini ileri sürmektedir. (2) TMA'nın mekanik özellikleri agregadan agregaya temasına dayanır, bu nedenle bağlayıcı varyasyonlarına geleneksel karışımlardan daha az duyarlıdır. (3) Yüksek bağlayıcı içeriği (yavaş yaşlanma) nedeniyle iyi dayanıklılık, geleneksel karışımlara kıyasla daha uzun hizmet ömrü (%20'ye kadar) ile sonuçlanır (4) İyi esneklik ve yorulmaya karşı direnç (3-5 kat artan yorulma ömrü), (5) İyi düşük sıcaklık

performansı, (6) İyi aşınma direnci, (7) İyi yüzey dokusu, (8) Geniş uygulama yelpazesi, (9) TMA, yoğun sınıf asfalt için mevcut olan aynı tesis ve ekipmanla üretilebilir ve sıkıştırılabilir ve (10) Uzun vadede daha ekonomiktir (Hainin vd., 2012).

TMA'nın dezavantajları ise şunlardır: (1) Daha yüksek bağlayıcı ve dolgu içerikleri ve elyaf katkı maddesiyle ilişkili artan maliyet, (2) TMA'daki yüksek dolgu içeriği, üretkenliğin azalmasına neden olabilir. Bu, uygun tesis modifikasyonlarıyla aşılabılır, (3) Bağlayıcı yüzeyin yıkanmasını önlemek için TMA karışımının 40°C'ye soğutulması gerektiğinden trafiğe açılmada olası gecikmeler ve (4) Başlangıçtaki kayma direnci, kalın bağlayıcı film trafik tarafından yüzeyin üstünden aşınana kadar düşük olabilmektedir. Uzun bir hizmet ömrü sağlayan iyi stabilite ve dayanıklılığın yanı sıra, TMA için şu avantajlar da iddia edilmektedir: (1) Sıkıştırma sırasında çok az sıkıştırdığı için çukurlu veya engebeli bir yüzeyin üzerine serilebilir. Bu ayrıca iyi uzunlamasına ve enine düzgünlük sağlamaya yardımcı olur. Farklı mat kalınlıklarında uygulandığında bile yüzeyin son düzgünlüğüne hiçbir zarar gelmez. (2) TMA'nın beklenen ikincil faydası, alttaki kaplama tabakasından yansıma çatlaklarının geciktirilmesidir. TMA'nın geleneksel yoğun dereceli asfalta (DGA) kıyasla göreceli performansına ilişkin bir gösterge, İskandinav asfalt teknolojileri tarafından verilmiştir ve Çizelge 2.1'de özetlenmiştir (Hainin vd., 2012).

Çizelge 2.1. TMA'nın göreceli performansı

Özellik veya Nitelik	TMA'nın Yoğun Gradasyonlu Asfalta Kıyaslanması
Kesme direnci	Çok daha iyi
Aşınma direnci	Çok daha iyi
Dayanıklılık	Çok daha iyi
Yük dağılımı	Biraz daha az
Çatlak direnci	Daha iyi / Çok daha iyi
Kayma direnci	Daha iyi
Su sıçratma	Eşit / Daha iyi
Işık yansıması	Daha iyi
Gürültü azaltma	Eşit / Daha iyi
Halk tarafından tanınma	Çok daha iyi

2.1.7. Taş mastik karışımlarda fiber kullanımı

Araştırmalar, asfalt karışımlarında lif kullanımının, karışımın güçlendirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Lifler, özellikle sürekli

gradasyona sahip karışımlarda ve TMA kaplamalarda, asfaltın taşınması ve inşası sırasında bozulmasını önlemek için bitüm stabilizasyonunda etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Hassan vd., 2005). Liflerin kullanımı, karışımın viskoelastisite özelliklerini değiştirerek dinamik modülünü artırmakta (Wu vd., 2007), neme karşı duyarlılığını iyileştirmekte (Putman ve Amirkhanian, 2004), akış tutarlılığını artırmakta ve tekerlek izlerine karşı direnç sağlamaktadır (Chen vd., 2004). Ayrıca, lifler asfalt karışımlarında ve üstyapılarda yansıtıcı çatlakların miktarını azaltmaya yardımcı olmaktadır (Maurer ve Malasheskie, 2009). Bu özellikler, liflerin asfalt kaplamalarının dayanıklılığını artırmak ve uzun vadeli performanslarını iyileştirmek için önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Fiberlerin asfalt kaplama karışımlarında kullanımı, karışımın dayanıklılığını artırmak ve performansını iyileştirmek için oldukça etkili bir yöntemdir. Selüloz ve mineral fiberler, özellikle Taş Mastik Asfalt (TMA), açık gradasyonlu ve poroz karışımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberlerin farklı türleri ve formları asfalt karışımlarında kullanılabilirken, en yaygın olanları selüloz, mineral ve polimer fiberlerdir (McDaniel, 2015).

Evet, fiberlerin asfalt karışımlarına eklenmesi, özellikle gerilmelerin doğru bir şekilde dağıtılması ve karışımın dayanıklılığının artırılması konusunda önemli bir rol oynar. Fiberlerin asfalt karışımındaki etkisi, sadece çekme mukavemetini artırmakla kalmaz, aynı zamanda karışımın elastikiyetini ve uzun vadeli performansını da iyileştirir. Gerilim yoğunluğu, asfaltın dayanım sınırlarını zorlayabileceği alanlarda fiberler devreye girerek, asfaltın zayıf olduğu bölgelerde bu gerilmeleri daha homojen bir şekilde yayar ve asfaltın yıpranmasını engeller.

Fiberlerin yüzey alanının büyük olması, karışım içindeki adezyonun gücünü artırarak, asfalt ve fiber arasında daha güçlü bir bağ oluşturur. Ayrıca, fiberlerin homojen bir şekilde karışıma dağılması, karışımın genel performansını artırır ve karışımın daha stabil olmasını sağlar. Bu özellikler, özellikle trafik yükleri, hava koşulları ve diğer çevresel faktörlere karşı asfalt kaplamaların daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasına katkı sağlar. Fiberlerin bu tür katkıları, TMA ve benzeri asfalt karışımlarının dayanıklılığını artırırken, bakım maliyetlerini de azaltabilir.

2.2. Atık Kağıt

2.2.1. Atık kağıtlar hakkında genel bilgiler

Atık kağıtların geri dönüşümü, kağıt endüstrisinde önemli bir yer tutmaktadır ve bu süreç, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir fayda sağlamaktadır. 1800'lü yıllarda İngiltere'de başlayan atık kağıt kullanımı, zamanla kağıt üretiminde yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Bu süreç, kağıt sektörünün gelişimine katkıda bulunmuş ve atık kağıtların ekonomik değeri anlaşılmıştır. Özellikle 1945 sonrasında Japonya ve Avrupa'da atık kağıtlar, kağıt endüstrisinin vazgeçilmez hammaddeleri arasında yer almaktadır.

Atık kağıtlar, ekonomiye önemli katkılar sağlamakta ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu malzemelerin geri dönüşümü, hammadde ihtiyacını azaltırken, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına da yardımcı olur. Ancak, sağlık ve hijyen açısından uygun olmayan kağıt türlerinin geri dönüşümü, sınırlıdır ve bu kağıtlar genellikle geri dönüştürülmez. Bununla birlikte, özellikle fabrikalardan çıkan kağıtlar, yazışma kağıtları ve gazeteler gibi atıklar, geri dönüşüm için değerli malzemelerdir ve endüstride yeniden kullanılabilir.

Geri dönüşüm, kullanılmaz hale gelmiş ve atılmış malzemelerin tekrar işlenerek yeniden kullanılabilir hale getirilmesi sürecidir. Atık kağıtların geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasına büyük katkı sağlamakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından son derece önemlidir. Kağıt üretimi için ormanlardan elde edilen ham maddelerin korunması, su ve enerji tüketiminin azaltılması gibi faydalar, geri dönüşümün en önemli avantajları arasında yer alır.

Örneğin, 1 ton atık kâğıdın geri dönüşümde kullanılması, 17 ağacın kesilmesini engeller. Bu durum, ormanların korunmasına katkı sağlarken, doğal habitatların ve biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilirliğine yardımcı olur. Ayrıca, atık kâğıdın geri dönüştürülmesi, enerji tasarrufu sağlar. Ofis kâğıdı üretimi için 10 ton odun hammaddesi ve 25 Gj enerji gereksinimi varken, atık kağıt kullanılarak aynı miktarda ofis kâğıdı üretmek yalnızca 1.5 ton odun ve 22 Gj elektrik enerjisiyle yapılabilir. Bu,

hem doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar hem de enerji tüketimini kayda değer bir şekilde azaltır.

Geri dönüşümün çevresel etkilerinin yanı sıra, ekonomik faydaları da büyüktür. Atıkların geri kazanılması, hammadde ihtiyacını azaltırken aynı zamanda atıkların azaltılması, depolama maliyetlerinin düşürülmesi ve karbon ayak izinin küçülmesi gibi birçok olumlu sonucu beraberinde getirir. Bu nedenle, kağıt ve diğer geri dönüştürülebilir malzemelerin geri dönüşümü, sürdürülebilir bir ekonomi için önemli bir adımdır.

2.2.2. Atık kağıtların kullanımı ve geri kazanımı

20. yüzyılın başlarında yaygın bir şekilde kullanılan vahşi depolama yöntemleri, çevre sağlığına ve kokuya yönelik ciddi sorunlar doğurduğundan terk edilmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde düzenli depolama ve yakma yöntemlerine geçiş, çevresel etkileri azaltmak için önemli bir adım olmuştur. 1970’li yıllarda enerji ve hammadde sıkıntıları, bu arayışların hız kazanmasına yol açmış, bu dönemde katı atık yönetimi alanında da yeni yöntemler geliştirilmiştir. Nüfus artışı ve şehirleşmenin hızlanması, arazi talebinin artmasına sebep olmuş ve bu durum, düzenli depolama alanlarının verimli kullanımını daha da önemli hale getirmiştir.

1980’li yıllarda geri kazanım yaklaşımının ön plana çıkması, hammadde ve doğal kaynaklardan tasarruf sağlamanın yanı sıra, depolama ihtiyacını büyük ölçüde azaltması nedeniyle dünyada etkisini genişletmiştir. Katı atıkların geri kazanımı, ekonomiye yeniden kazandırılmasına olanak tanırken çevre üzerindeki olumsuz etkileri de en aza indirmiştir. Değerlendirilebilir katı atıklar arasında kâğıt, karton, plastik, metal, cam gibi materyaller yer almakta ve bu atıkların geri kazanımı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli bir strateji haline gelmiştir.

Özellikle ambalaj atıkları, gelişen tüketim alışkanlıkları ve artan refah seviyesiyle birlikte katı atık içindeki oranını giderek artırmaktadır. Bu durum, gelişmiş ülkelerde daha önce fark edilip önlem alınmışken, gelişmekte olan ülkelere, özellikle Türkiye’de, 1990’lı yıllarda çevre bilincinin artmaya başlamasıyla birlikte gündeme gelmiştir. Türkiye’de geri kazanım bilinci henüz gelişmiş ülkelere oranla düşük olsa

da, çevre bilincinin artmasıyla birlikte çeşitli hukuki, idari ve teknik tedbirler alınmaya başlanmış ve geri kazanım süreçleri toplumsal bir sorumluluk haline gelmiştir.

Geri dönüşüm, günümüzde sadece bir atık yönetimi stratejisi olarak kalmayıp, çevre bilincinin yükseldiği, etik bir duruş sergileyen ve toplumsal bir sorumluluk haline gelmiştir. Gelişmiş ülkelerde bu süreçler büyük ölçüde kamusal alanlarda sahiplenilmişken, Türkiye’de de toplumun çevreye duyarlılığı arttıkça geri kazanım çalışmalarına yönelik daha fazla destek sağlanmaktadır.

Kâğıt ve karton en çok kullanılan ambalaj malzemesi türüdür. Değerlendirilebilir nitelikli atıkların yarısından fazlasını kâğıt ve karton oluşturmaktadır. Kâğıdın hammaddesini ‘selüloz’ adı verilen madde oluşturur. Selüloz son derece kıymetli bir madde olup kaynağı ormanlarımız ve özel yetiştirilen bitki türleridir. Bu nedenle, belki de en kıymetli atık cinsi kâğıt ve kartondur. Kâğıt öncelikle kâğıt çamuru hazırlamak için, su içerisinde liflerine ayrılır. Eğer gerekirse içindeki lif olmayan yabancı maddeler için temizleme işlemine tabi tutulur. Mürekkep ayırıcı olarak, sodyum hidroksit veya sodyum karbonat kullanılır. Daha sonra hazır olan kâğıt lifleri, geri dönüşmüş kâğıt üretiminde kullanılmaktadır. Bir ton atık kâğıt veya kartonun geri dönüşümü ile 16 adet yetişmiş çam ağacı ve 85 m²’lik alan tahrip edilmemiş olacaktır. Bu da Türkiye’de yılda 80 milyon çam ağacı ve 40 000 hektar ormanlık arazinin korunması demektir. Ayrıca atık kâğıt sürekli geri kazanılamaz her geri kazanımda, liflerin boyu kısılır ve liflerin yapışması için yardımcı maddeler ilave edilmeden yeni kâğıt üretilmez (Meral, 2014).

Geri dönüştürülmüş kâğıt ve kartondan elde edilen malzemeler şu şekildedir:

- Fluting ve Test Liner (Dış ambalaj kutuları, buzdolabı, TV, vb.)
- Kromo karton (İlaç, deterjan kutuları)
- Temizlik kâğıtları (Peçete, mendil, tuvalet kâğıdı)
- Yazı kâğıtları (Defter ve kitap)
- Yumurta kartonları
- Çatı kaplamaları

2.2.3. Atık kağıt bardak

Gıda sektöründe ambalaj seçimi, ürünün korunmasını sağlamak ve tüketiciye ulaşımını kolaylaştırmak açısından büyük önem taşır. Bu seçimde, ambalaj malzemesinin kolay bulunabilirliği, uygun fiyatlı olması, hafifliği gibi özellikler öne çıkarken, aynı zamanda ürünün tazeliğini koruması, nem, oksijen ve mikrobiyal canlılardan korunması gibi faktörler de dikkate alınır.

Tek kullanımlık kağıt bardaklar, gıda sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan ambalaj türlerinden biridir. Bu tür ürünler, özellikle kahve ve çay gibi içeceklerin tüketiminde tercih edilmektedir. Dünya çapında, yılda yaklaşık 30 milyar kağıt bardak tüketildiği tahmin edilmektedir. 2021 itibarıyla tek kullanımlık kapların pazar büyüklüğü 16.3 milyar dolara ulaşmıştır. Özellikle kahve ve çay satış noktalarında, pratikliği ve taşınabilirliği nedeniyle tek kullanımlık kağıt bardaklar daha popüler hale gelmiştir (Günaydın, 2024).

Bu tür ürünlerin tercih edilmesinin bir diğer sebebi de, tüketicilerin hızla çözüm bulabilmesi ve geri dönüşüm ile çevreye duyarlı seçenekler arayışındır. Ancak, artan kullanım ve çevresel etkiler, tek kullanımlık ürünlerin sürdürülebilirlik açısından daha dikkatli değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Kağıt bazlı tek kullanımlık ürünler, özellikle selüloz içeriği nedeniyle doğal olarak suyu emme eğilimindedir. Bu ürünler, yiyecek ve içeceklerin saklanması veya pişirilmesi sırasında sızıntıyı önlemek için genellikle plastik kaplamalarla güçlendirilir. Selüloz, su molekülleriyle hidrojen bağları oluşturarak suyu emme kapasitesine sahipken, bu nedenle suya dayanıklılık ve dayanıklılığın artırılması için düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kaplama kullanılır. Tek kullanımlık kağıt bardakların çoğu, toplam ağırlığının yaklaşık %5'ini oluşturan bu kaplama ile dayanıklı hale gelir. Bu kaplama genellikle 10 ila 30 µm kalınlığında tutulur ve yaygın olarak paketlenme malzemelerinde kullanılır. Ancak, LDPE'nin biyolojik olarak parçalanmaması ve çevresel etkileri, sürdürülebilirlik endişelerini beraberinde getirir.

Biyolojik olarak parçalanabilen malzemelere olan eğilim arttıkça, polilaktik asit (PLA) gibi alternatif biyoplastikler ön plana çıkmaktadır. Bu tür malzemeler, fermente mahsullerden elde edilerek çevreye daha duyarlı çözümler sunar.

Dünyada tek kullanımlık kağıt bardakların kullanım oranları oldukça yüksektir. Birleşik Krallık'taki büyük kahve zincirlerinin her yıl yaklaşık 500 milyon tek kullanımlık bardak kullandığı tahmin edilmektedir. ABD'de ise her yıl yaklaşık 50 milyar tek kullanımlık kağıt bardak kullanılmaktadır. Kanada'da bu sayı 14 milyar, Hindistan'da ise 11.5 milyon olarak raporlanmıştır. 2006 yılında yalnızca ABD'de 6.5 milyon ağaç kesilmiş ve 4 milyar galon su ile 253 milyon pound atık ortaya çıkmıştır. Bu, yalnızca 16 milyar kağıt bardağın üretimi için harcanan kaynakları göstermektedir. Bu veriler, tek kullanımlık ürünlerin çevresel etkilerini ve sürdürülebilir alternatiflere olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Günaydın, 2024).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada materyal olarak Isparta belediyesinden temin edilen bazalt grubu agregalar, Göltaş Kalker Taşocağında (Isparta) üretilen ince agrega, mineral filler, polimer modifiye bitüm (PMB) ve %0.35 selülozik elyaf kullanılmıştır. Aliağa rafinerisinden elde edilen B 50/70 penetrasyona sahip bitüm, Elvaloy RET (%1.6) ve polifosforik asit (%0.2) (PPA) ile modifiye edilmiştir ve selülozik elyaf yerine atık kağıt bardak (AKB) kullanılmıştır. Kullanılan materyallere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Taş mastik asfalt kaplamalarda kullanılan agregalar ve gradasyon

Agrega, asfalt karışımlarında kullanılan ve taşıma, dayanıklılık gibi önemli işlevleri yerine getiren temel bileşenlerden biridir. Agregaların kalitesi, bitümlü malzemelerin performansını doğrudan etkiler. Kaba agrega, 4.75 mm'den büyük olan elekten geçen, genellikle kırmataş veya kırma çakıldan oluşan malzemelerdir. Bu agregaların içerdiği organik maddeler, kil toprakları ve diğer zararlı bileşenlerin olmaması gerekmektedir. Bu sebeple, agregaların sert, temiz ve dayanıklı olmaları büyük önem taşır.

TMA aşınma tabakalarında kullanılan karışımlarda genellikle yüksek kaliteli magmatik kayaçlar, örneğin granit ve bazalt, tercih edilir. Bu tür kayaçlar, agregaların daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Çakıl kullanıldığında ise agregaların yüzeyinin kırılmış olması gerekmektedir, çünkü kırılmış yüzeyler bitümle daha iyi yapışarak daha sağlam bir karışım sağlar. Isparta belediyesinden (Isparta) elde edilen 13-19 mm, 5-13 mm ve 0-5 mm boyutlarındaki bazalt grubu agregalar, bu tür asfalt karışımlarında kullanılacak uygun kaba agregalar örnekleridir (KGM, 2013; Özdaş, 2021) (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Kaba agregâ özellikleri (KGM, 2013; Özdaş, 2021)

Deney	Şartname Litimleri	Deney Standardı
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤25 (LA ₂₅)	TS EN 1097-2 ^a AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp	≤20 (M _{DE} 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp) %	≤14 (MS ₁₄)	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %	≤25	BS 812
	≤20 (FI ₂₀)	TS EN 933-3 ^a
Cilalanma Değeri, %	≥50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
	≥40 (PSV ₄₀) binder için	
Kırılmışlık, ağırlıkça, % (Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)	≥100 - ≤0 (C _{100/0})	TS EN 933-5
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı Yüzey), % (24 saat 60°C suda bekletmeden sonra)	≥60	TS EN 12697-11 (Kısım403 EK-A)
Su Emme, %	≤2.0 (WA ₂₄₂)	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	Bulunmayacak	ASTM C 142 AASHTO T 112
^a Referans metot. ^b Gerek görüldüğünde yapılacaktır. ^c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043'deki sınıfını gösterir.		

İnce agregâ, 4.75 mm'den küçük olan ve genellikle kırmataş, kırma çakıl veya bunların bileşenlerinden oluşan malzemelerdir. İnce agregâlar, bitümle karışımında iyi bir bağ kurarak asfaltın dayanıklılığını artırır. Bu agregâların, kil topakları, gevrek malzemeler, organik maddeler ve diğer zararlı bileşenlerden arındırılmış olması gerekmektedir. İnce agregâların sert ve dayanıklı olması, asfaltın uzun ömürlü olmasını sağlar (Çizelge 3.2).

Çalışmada ince agregâ olarak bazalt kullanılması, yüksek kaliteli magmatik kayaçların özelliklerinden dolayı asfalt karışımının dayanıklılığını artırmakta önemli bir tercih olmuştur. Bazalt, doğal olarak sert ve dayanıklı olduğu için asfalt karışımının performansını olumlu yönde etkiler (KGM, 2013; Özdaş, 2021).

Çizelge 3.2. İnce agregâ özellikleri (KGM, 2013; Özdaş, 2021)

Deney		Şartname Limitleri	Deney Standardı
Plastisite İndeksi		N.P.	TS-1900-1
Organik Madde, %		Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		≤2.0 (WA ₂₄₂)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤1.5 (MB _{1.5}) ≤3.0 (MB _{3.0})*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤3.0 (MB _{3.0})*	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

No. 200 elekten geçen malzeme, filler olarak adlandırılır ve asfalt karışımlarında önemli bir rol oynar. Filler, genellikle taş tozu ve sönmüş kireçten oluşur. Mineral filler, asfalt karışımındaki boşlukları doldurmak ve bitümle daha iyi bir bağ sağlamak amacıyla kullanılır. Fillerin, tamamen kuru olması ve topak, kil, organik madde ve diğer zararlı bileşenlerden arındırılmış olması gerekmektedir. Bu özellikler, fillerin asfalt karışımındaki performansını ve dayanıklılığını etkiler.

Mineral filler, asfaltın viskozitesini artırarak, karışımın dayanıklılığını sağlar ve karışımın işlenebilirliğini de olumlu yönde etkiler. Fillerin kalite kriterlerine uygun olması, karışımın uzun ömürlü olmasını sağlamak için çok önemlidir (KGM, 2013). Çizelge 3.3'te belirtilen özelliklere uygunluk, bu malzemenin kalite kontrolü açısından gereklidir.

Çizelge 3.3. TMA'da kullanılacak mineral filler gradasyon limitleri (KGM, 2013)

Elek Boyu		Geçen %
İn, No	mm	
No.40	0.425	100
No.80	0.180	85-100
No.200	0.07	70-100

Çalışma kapsamında, Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KTŞ) standartlarına uygun olarak belirlenen TMA (Taş Mastik Asfalt) bölümü kriterleri dikkate alınarak malzeme seçimi yapılmıştır (KTŞ, 2013). Kullanılan agregalar, dayanıklı, sağlam ve temiz yapıda olan kırmataşlardan seçilmiştir. Kaba agregâ bileşeni olarak, 4.75 mm'lik

İnce agrega bileşeni olarak, daha yumuşak bir yapıya sahip kalker kullanılmıştır. Kalker, gradasyon hesaplamalarında ilave mineral filler olarak da değerlendirilmiştir. Kalker agregası, bitümlü karışımın özelliklerini iyileştirecek şekilde kullanılmıştır. Ayrıca, kırmataş tozu, kireçtaşının kırılmasından elde edilen ve 0.075 mm'lik elekten geçen malzeme olarak filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu filler malzemesi, karışımın işlenebilirliğini artırarak, asfaltın uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

TMA tasarım gradasyonu, en az dört ayrı dane grubunun belli oranlarda birleşiminden meydana gelerek belirli tolerans limitleri içinde hazırlanır. Bu gradasyon, TMA aşınma ve TMA binder olmak üzere iki farklı kullanım tipine sahiptir. TMA aşınma

gradasyonu da kendi içinde TMA Tip-1A, TMA Tip-1B ve TMA Tip-2 olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır.

Bu gradasyon tiplerinin herbiri, bitümlü malzeme ile karıştırıldığında agregaların üniform bir şekilde dağılması sağlanmalıdır. Bu, asfalt karışımının dayanıklılığını ve performansını artırmak için önemlidir. TMA aşınma tabakası için belirlenen gradasyon limitleri, belirli agregaların boyutlarının hangi aralıkta olması gerektiğini tanımlar ve bu limitler, asfaltın uzun ömürlü, dayanıklı ve düzgün bir yüzeye sahip olmasını sağlamak için büyük önem taşır.

TMA aşınma tabakası gradasyon limitleri, Çizelge 3.4'te belirtilen değerlere dayanarak belirlenmiştir ve bu limitler, TMA'nın çeşitli tiplerinin uygun performans göstermesi için gereken kriterleri içermektedir (KGM, 2013; Özdaş, 2021).

Çizelge 3.4. TMA aşınma gradasyonu ve tolerans (KGM, 2013)

Elek Boyutu		TMA TİP-1		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B		
in, No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
3/4"	19,0	100	100		
1/2"	12,5	90-100	90-100	100	± 4
3/8"	9,5	50-75	50-67	90-100	± 4
No.4	4,75	25-40	25-35	25-45	± 3
No.10	2,00	20-30	20-30	20-30	± 3
No.40	0,425	12-22	12-22	12-22	± 3
No.80	0,180	9-17	9-17	9-17	± 3
No.200	0,075	8-12	8-12	8-12	± 2

3.1.2. Bitümlü bağlayıcı

Bitüm, karbon, hidrojen, nitrojen, sülfür, oksijen gibi kimyasal elementlerin yanı sıra az miktarda metal içeren organik bir malzemedir. Katı veya yarı katı formda doğal olarak temin edilebilen bitüm, aynı zamanda ham petrolün işlenmesi veya kömürün karbonizasyonu sırasında yan ürün olarak da elde edilebilir. Bitüm, ısıya duyarlı bir

malzemedir ve yüksek sıcaklıklarda akıcı hale gelirken, oda koşullarında katı veya yarı katı formda kalır.

Bitüm, farklı amaçlar için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları arasında çatı ve su yalıtımı, su yapılarında sızdırmazlık tabakaları, demir-çelikten üretilen boru ve hatlarının korozyona karşı korunması ve sıcak karışım asfalt yer alır. Bitümün ekonomik değeri yüksek olan bu çok yönlü kullanımları, yapı malzemeleri sektöründe önemli bir yer tutmasını sağlamaktadır.

Bitümlü bağlayıcılar, agregalarla birleştirilerek yol üstyapısını oluşturur. Bitümün, sıcak karışım asfalt içerisindeki oranı her ne kadar düşük olsa da (%4-7), yol üstyapısının yapısal ve fonksiyonel performansını önemli ölçüde etkiler. Bitümler genellikle penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Amerika'da ise son yıllarda "Superpave" sistemine dayalı olarak viskozite ve performans derecelerine göre sınıflandırma yapılmaktadır (Selman ve Gürer, 2016).

Çalışmada kullanılan bitüm, Aliğa rafinerisinde üretilen ve Isparta Belediyesi asfalt şantiyesinden temin edilen bitümdür. Kullanılan bitüm, B 50-70 penetrasyon sınıfına sahip olup, modifikasyon için Elvaloy RET (%1.6) ve Polifosforik Asit (PPA) (%0.2) katkıları ile modifiye edilmiştir.

TMA üretiminde, modifiye edilmemiş bitüm, TS EN 12591 standardına uygun olarak 40/60 veya 50/70 penetrasyon sınıfına sahip olmalıdır. Polimerle modifiye edilmiş bitüm ise TS EN 14023 standardına uygun olmalıdır (KGM, 2013). Modifiye bitüm üretimi, kaya asfaltları, göl asfaltları, termoplastik polimerler, lateks ve kauçuk gibi katkı maddeleri ile yapılmaktadır. Modifiye bitümün özelliklerinin ise, Çizelge 3.5'te belirtilen şartlara uygun olması gerekmektedir (KGM, 2013).

Çizelge 3.5. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Sıra No	DENEY ADI		STANDARDI	BİRİMİ	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16
1	PENETRASYON (25°C,100g,5sn.)		TS EN 1426	0,1mm	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	52	62	62	62	67	67	67	72
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE ^a (25°C'de, 5cm/dk)	min.	TS EN 13589	J	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C)	min.	TS EN 13398	%	80	60	70	80	60	70	80	60
5	PARLAMA NOKTASI	min.	TS EN ISO 2592	°C	220	220	220	220	220	220	220	220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK		TS EN 15326	g/cm ³	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^b		TS EN 13399									
7,1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	maks.		°C	5	5	5	5	5	5	5	5
7,2	PENETRASYON FARKI	maks.		0,1mm	12	12	12	12	9	9	9	9
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >1kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ ^c		TS EN 12607-1									
9,1	KÜTLE KAYBI	maks.		%	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,5
9,2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	50	60	60	60	65	65	65	70
9,3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik											
	artma	maks.		°C	8	8	8	8	8	8	8	8
	azalma	maks.		°C	5	5	5	5	5	5	5	2
9,4	KALICI PENETRASYON	min.	TS EN 1426	%	50	50	50	50	45	45	45	40
9,5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >2,2kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler		TS EN 14769 AASHTO R28									
10,1	DSR (G*/sinδ <5000kPa)	Yenilme Sıcaklığı maks.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	22	31	28	25	34	31	28	37
10,2	KİRİŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S≤300 MPa, m≥0,300)	Sıcaklık maks.	TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	°C	-18	-6	-12	-18	-6	-12	-18	-6

3.1.3. Bitüm modifikasyonunda katkı olarak kullanılan Elvaloy RET

Çalışmada bitümün modifiye edilmesi amacıyla Dupont firmasının üretmiş olduğu ‘ELVALOY™ 5160 Copolymer’ (Elvaloy RET) kullanılmıştır. ELVALOY™ 5160 Copolymer (Elvaloy RET) yol kaplamalarında (asfalt karışımlarında) kullanılan asfalt bağlayıcının özelliklerini değiştirmek için kullanılabilen Reaktif Elastomerik Terpolimerdir (RET) (Anonim, 2025).

Elvaloy RET, etilen, n-bütül akrilat ve glisid metakrilat (GMA) içeren bir terpolimerdir. Bu polimerin yapısı, üretim sürecine bağlı olarak moleküler ağırlık ve komonomer oranlarında farklılıklar gösterebilir. Elvaloy RET bitümle karıştırıldığında ve ısıtıldığında, GMA kısmı asfaltten karboksilik asit grubuyla kimyasal tepkimeye girer. Bu reaksiyon sonucunda Elvaloy RET terpolimerleri asfalt molekülüyle kovalent bağ yapar ve bu bağlar ayrılmaz hale gelir (Seloğlu, 2015). Bu özellik, Elvaloy RET'in bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme kapasitesine sahip olmasını sağlar.

Elvaloy RET, asfalt yolların daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu modifikasyon, özellikle yüksek sıcaklıklar ve trafik yükleriyle karşılaşan yollarda önemli avantajlar sunar. Polimer modifikatörlü asfaltların (PMA) tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, soğuk hava koşullarında meydana gelen çatlaklara karşı direnç göstermeleri ve tekerlek izi oluşturmeyen kaplama malzemelerinin kullanılmasına olanak sağlamasıdır. Polimerle modifiye edilmiş asfalt, yüksek elastikiyet göstererek ağır trafik yüklerine karşı uzun süre dayanır, yorulmadan ve çatlak oluşumu olmadan daha uzun süre hizmet verir. Bu sayede, Elvaloy RET'in asfaltın zayıf özelliklerini iyileştirerek, yol performansını artırdığı görülmektedir (Seloğlu, 2015).

Elvaloy RET ile yapılan sıcak karışım asfaltlar, tekerlek izi oluşumuna, soğuktan çatlamaya, soyulmaya ve aşınmaya/yorulmaya karşı mükemmel direnç gösterir. Elvaloy RET ile inşa edilen yollar, 1991 yılından bu yana kullanılmakta olup uzun süreli dayanıklılık sergilemektedir. Ayrıca, Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi (NCAT) tarafından yapılan testlerde, modifiye edilmemiş asfaltlar ile polimer değişkenli (PMA) asfaltlar içeren SHRP Superpave karışımları karşılaştırılmış ve bu

testlerde Elvaloy RET ile yapılan karışımların tekerlek izi direnci konusunda üstün olduğu belirlenmiştir (Seloğlu, 2015). Bu, Elvaloy RET'in asfaltın performansını önemli ölçüde artırdığına işaret etmektedir.

Elvaloy RET, bitüme düşük miktarda eklenerek, geliştirilmiş elastomerik özelliklere sahip kalıcı modifiye edilmiş bir bağlayıcı oluşturur. Bu modifikasyon, asfaltın performansını artırarak dayanıklılığını ve elastikiyetini geliştirir. Elvaloy RET, top şeklinde, yuvarlak ve beyazımsı bir görünüme sahiptir (Şekil 3.2). Bu özellikleri sayesinde, asfaltın uzun ömürlü ve zorlu koşullara dayanıklı olmasına katkı sağlar.



Şekil 3.2. Elvaloy RET

3.1.4. Bitüm modifikasyonda kullanılan Polifosforik asit (PPA)

Polifosforik asit (PPA), birçok endüstride kullanılan bir katkı maddesidir ve bitüm bağlayıcılarının modifikasyonunda önemli bir rol oynar. PPA katkısının, bitümün reolojik özelliklerini iyileştirerek sıcaklık dayanımını artırdığı ve performansını geliştirdiği bilinmektedir. PPA'nın bitüme eklenmesiyle viskozite artışı, yumuşama noktasında yükselme, oda sıcaklığında penetrasyon düşüşü ve düşük sıcaklıklarda penetrasyon artışı gözlemlenebilir. Bu değişiklikler, bitümün mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını iyileştirir.

PPA, özellikle diğer modifiye edici katkılarla birlikte kullanıldığında, bitümün işlenebilirliğini artırarak depolama sonrası kullanımını kolaylaştırır ve düşük

sıcaklıklarda daha iyi performans sergilemesini sağlar. PPA'nın eklenmesi, bitümün uzun süreli depolama sırasında faz ayrımını engeller, oksidasyonu azaltır ve viskoziteyi artırarak, asfalt kaplamaların yüksek sıcaklık ve trafik yüklerine karşı dayanıklılığını artırır.

Çalışma kapsamında, ticari amaçla üretilen PPA, bitüm ile %0.2 oranında karıştırılarak saf bitümün modifikasyonu sağlanmıştır. Bu modifikasyon, asfalt kaplamaların kalıcı deformasyonlar, tekerlek izi oluşumu ve aşınma gibi sorunlara karşı dirençlerini artırmaktadır.

3.1.5. Taş mastik asfaltta kullanılan selülozik fiber (SF)

TMA karışımlarında, bağlayıcının drenajını önlemek için stabilize edici katkıları kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerine stabilizör veya drenaj inhibitörleri denilmektedir. Bu katkıları, yüksek bağlayıcı içeriğinde agregaları karışım içinde sabitleyerek dengeler ve bitümün agregalardan süzülmesini engellemektedir. Stabilizörler, bağlayıcı emici katkıları (mineral, selüloz lifler) veya viskozite artırıcı katkı (polimerler) maddelerinden meydana gelmektedir. Lifler, bağlayıcı bitümün bir kısmını emerek muhtemel drenajı engellemektedir. Polimerler ise bağlayıcının viskozitesini arttırdığından dolayı bitümün drenaj riskini azaltmaktadır (Blazejowski, 2016; Özdaş, 2021).

TMA karışımlarında en popüler katkı maddeleri, bağlayıcı emici özelliğe sahip olan stabilizörlerdir. Bu stabilizörler bazı özellikleri sağlaması gerekmektedir. Stabilizörler, kayma düzlemleri oluşturmamalı ve agregalar arası kenetlenme mukavemetini azaltmaması gerekmektedir. Yeterli miktarda bağlayıcıyı yüksek emme gücüyle karışımında tutması ise en önemli özelliğidir. Bu tip stabilizörler çeşitli hammadde ürünleriyle ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

- Selülozlardan,
- Öğütülmüş veya parçalanmış kâğıt atıklarından,
- Mineral elyaflardan,
- Selüloz ve mineral liflerin karışımından,

- Selüloz lifleri ve farklı tipte polimerlerin karışımından,
- Selüloz lifleri ve sentetik mumların karışımından,
- İşlenmiş ve parçalanmış tekstil atığı ürünlerinin ipliklerinden,
- Polipropilen gibi plastik ürünlerinden,
- Cam elyaf yünü gibi ipliklerden,
- Deri tozları gibi deri atığı ürünlerinden ortaya çıkmaktadır (Blazejowski, 2016; Özdaş, 2021).

Selüloz lifler, stabilizörler arasında emici güç açısından en etkili olanlardan biridir. Bu özellikleri sayesinde bağlayıcı maddeleri (bitüm, bal mumu vb.) sıkıca tutarak karışımın dayanıklılığını artırır. Selüloz lifler, genellikle düzensiz şekilli gevşek lif formlarında, bağlayıcı madde içermeyen liflerin pelet haline getirilmiş granül formlarında ya da bağlayıcı madde ile karıştırılmış silindirik granüller şeklinde bulunabilir. Bu stabilizörlerin kullanımı, özellikle asfalt karışımlarında, bağlayıcı maddelerin etkin bir şekilde yerinde tutulmasını ve karışımın homojen olmasını sağlar. Sonuç olarak, malzemenin performansını iyileştirir ve daha sağlam bir yapı oluşmasına yardımcı olur (Blazejowski, 2016; Özdaş, 2021).

TMA karışımlarında stabilizatör olarak tercih edilen selüloz lifler, yüksek emici kapasiteleri nedeniyle seçilmektedir. Bu özelliği sayesinde, birçok ülke farklı markalarla selüloz içeren elyaflar üretmektedir. Almanya'da üretilen Viatop markalı selülozik elyaf, özellikle ABD ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılan stabilizatörlerden biri olup, drenajı engelleme işlevine sahiptir. Ayrıca, Topcel, Viatop, Stilobit, HiperCell ve Antrocel gibi farklı markalar da selülozik elyaf üretmektedir. Bu çalışmada ise Fibrocel markalı selüloz fiber kullanılmıştır (Şekil 5.3).

TMA karışımlarında bitümün drenajını önlemek amacıyla genellikle mineral ya da selüloz elyaf stabilizatörleri kullanılmaktadır. Bu elyaflar, TMA aşınma gradasyon tipleri için karışımın %0.3-1.0'ı, TMA binder gradasyon tipi için ise karışımın %0.2-0.8'i kadar ilave edilir. Bu oranlar, üretici firma tarafından önerilen oranlarla da uyumlu olabilir. Elyaf dozajı için kabul edilebilir tolerans sınırı, kullanılan elyafların ağırlığının $\pm\%10$ 'u kadar olmaktadır. Elyaflar, silodan otomatik sistemle karıştırıcıya beslenerek karışıma eklenir. Mineral veya selüloz elyafların özellikleri, sırasıyla

Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de belirtilen standartlara uygun olmalıdır (KTŞ, 2013; Aslan, 2020; Özdaş, 2021).

Çizelge 3.6. Mineral elyaf özellikleri (KTŞ, 2013)

Fiber Uzunluğu (maksimum)	6 mm
No.40 (0.425 mm) elekten geçen	%95 (min.)
No.200 (0.075 mm) elekten geçen	%65 (min.)

Çizelge 3.7. Selüloz elyaf özellikleri (KTŞ, 2013)

Kül Muhtevası	%18±%5
pH	7.5±%1
Yağ Absorbsiyonu	Elyaf Ağırlığının 5±1 katı
Nem Absorbsiyonu	Ağırlıkça %5

Çalışmada ticari olarak üretilen selülozik fiber kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan selülozik fiber

3.1.6. Taş mastik asfaltta kullanılan atık kağıt bardak (AKB)

Çalışmada, atık kağıt bardaklar hammadde olarak kullanılmıştır. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğrenci kantininden toplanan atık kağıt bardaklar, temizlenmek amacıyla çeşme suyu ile yıkanmıştır. Ardından, oda sıcaklığında 2 gün süreyle kurutulmuş olan kağıt bardaklar (Şekil 3.4), atık parçalama

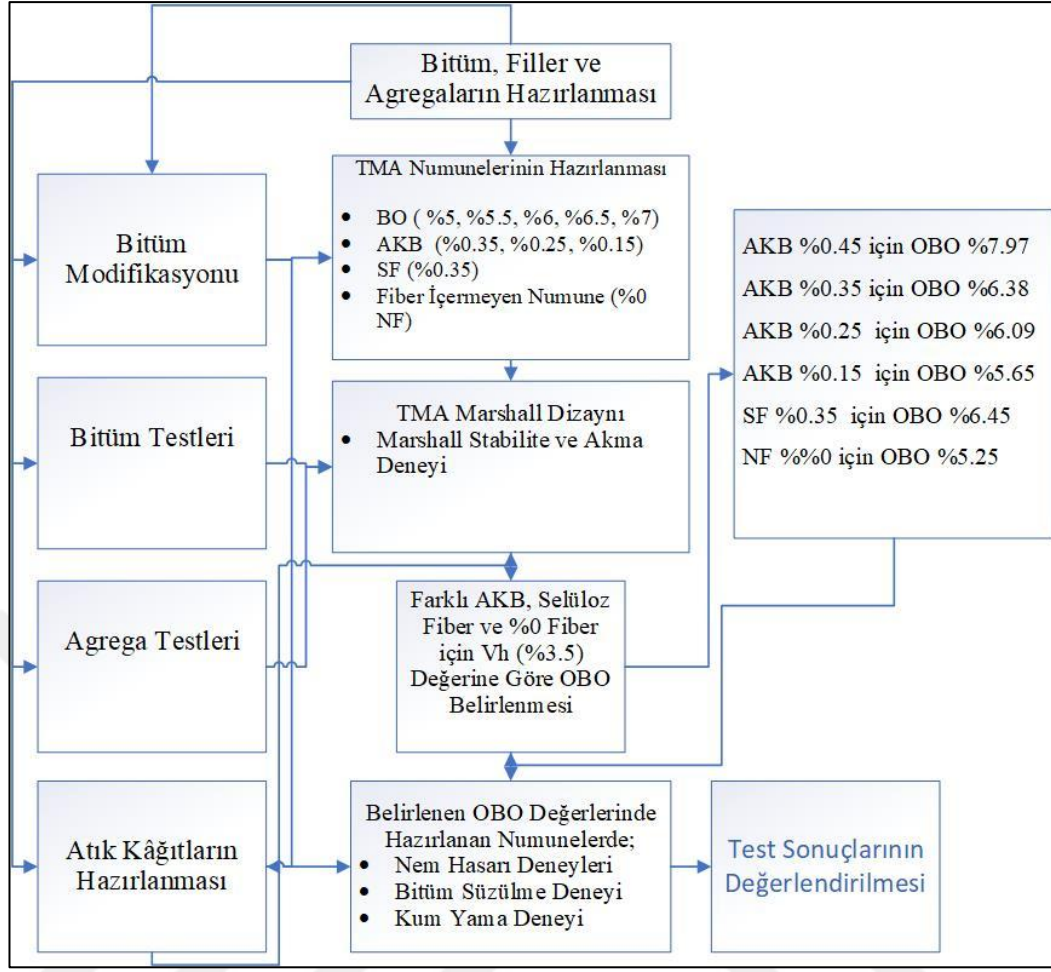
makinesinde 3-5 mm boyutlarında küçük parçalara ayrılmıştır. Son olarak, parçalanmış atık kağıt bardaklar nemlerini kaybetmeleri için 24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta kurutulmuştur (Günaydın, 2024). Ayrıca, bardakların kalınlıkları dijital mikrometre ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda bardak kalınlıkları şu şekilde belirlenmiştir: EPS: 1880 $\mu\text{m} \pm 0.005$; PP, PET ve PE bardaklar: 350 $\mu\text{m} \pm 0.01$; PE film: 200 $\mu\text{m} \pm 0.01$; PS: 850 $\mu\text{m} \pm 0.01$.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan atık kağıt bardak

3.2. Yöntem

Çalışmanın bu kısmında mineral agrega, mineral filler, bitüm, bitüm modifikasyonu ve TMA numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Deney prosedürünü özetleyen akış şeması Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Deneysel çalışmalara ait akış şeması

3.2.1. Agregada deneyleri

Taş mastik asfalt karışımlarında, agregalar arasındaki temasın daha yoğun olması nedeniyle, bu karışımdaki agregaların, geleneksel asfalt beton kaplamalarındaki agregalardan daha yüksek kalitede olması gerekmektedir (Akpolat, 2014).

3.2.1.1. Elek analizi (TS EN 933-1/2)

Elek analizinde, bitümlü kaplamalarda kullanılacak agregaların dane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla farklı açıklık genişliklerine sahip elekler kullanılır. Bu dağılıma granülometri denir (Anonim, 2020). Elde edilen gradasyon, sınıflandırma, agregada karışım oranlarının hesaplanması ve şartnameye uygunluğunun kontrol edilmesi için kullanılır. Deney öncesinde, agregada numuneleri homojen bir şekilde karıştırılır. Gerekli numune miktarı, dörtleme yöntemi (çeyrekleme) ile hazırlanır. Bu

yöntemde, agrega numuneleri koni şeklinde bir yığın haline getirilir ve çalışma yüzeyine dökülür. Ardından yığın dört eşit parçaya ayrılır. Karşılıklı iki çeyrek karıştırılıp, gereken numune miktarında alınır. Numuneler $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir etüvde 24 saat kurutulur ve ardından tartılır. Kuruyan numuneler elek sarsma cihazıyla elenir, her elekte kalan numune tartılır. Tartım oranları formüllerle hesaplanıp (Denklem 3.1) elek analizine dair forma aktarılır (Durmaz, 2024).

$$P_s = \frac{W_s}{W_t} \times 100 \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde; P_s : elek üstünde kalan malzeme oranı (%), W_s : elek üstünde kalan malzeme miktarı (gr), W_t : Toplam numune miktarı (gr)

3.2.1.2. İri ve ince agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyleri (TS EN 1097-6)

İri agregaların özgül ağırlık testi, agregaların yoğunluğunu ölçmek amacıyla yapılan bir laboratuvar deneyidir. Bu test, inşaat malzemelerinin kalitesini değerlendirmede ve tasarım hesaplamalarında önemli bir parametre olarak kullanılır. Su emme testi ise iri agregaların su emme kapasitesini belirlemek için yapılan bir testtir. Bu test, agregaların nem duyarlılığını değerlendirmek ve yapı malzemelerinin performansını etkileyen su emme özelliklerini belirlemek açısından önemlidir (Selman, 2015; Durmaz, 2024).

4.75 mm elek üstünde kalan iri agregaların özgül ağırlığını ve su emme oranını tespit etmek amacıyla hazırlanan numuneler, su dolu bir kaba 24 saat süreyle bırakılır. Numuneler suya doymun hale geldikten sonra, kaptaki su boşaltılır. Numuneler, emici bir bezle üzerindeki fazla suyu alacak şekilde kurulur. Doymun kuru yüzey hale getirilen numuneler tartılır (W_{dky}). Ardından agrega numunesi sepete yerleştirilip su içerisinde tartımı yapılır (W_{su}). Son olarak, su içerisinde tartılan numuneler bir kaba alınıp 110°C 'de etüvde kurutulmaya bırakılır. Kuruyan numuneler oda sıcaklığına gelene kadar bekletildikten sonra, kuru numune tartılır (W_{kuru}) (Selman ve Gürer, 2016). Tartım sonuçları ve Denklem (3.2), Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) kullanılarak özgül ağırlık ve su emme oranı hesaplanır;

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlık} = \frac{A_k}{(B_k - C_k)} \quad (3.2)$$

$$\text{Zahri Özgöl Ağırlık} = \frac{A_k}{(A_k - C_k)} \quad (3.3)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{(B_k - A_k)}{A_k} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde; Ak: Kuru numune ağırlığı (gr), Bk: Yüzey kuru-su doymun numune ağırlığı (gr), Ck: Yüzey kuru-su doymun numunenin sudaki ağırlığı (gr).

4.75 mm elek altındaki ince agregaların özgül ağırlığını ve su emme oranını belirlemek için, numune ilk olarak su dolu bir kaba yerleştirilir ve 24 saat boyunca suya doymun hale gelmesi beklenir. Sonrasında, numunede malzeme kaybı olmaması için düzgün bir şekilde süzülüp kuru bir yüzeye alınır. Numune, sıcak hava akımı altında doymun kuru yüzey haline getirilene kadar bekletilir. Doymun kuru yüzeye ulaştığı tahmin edilen numune, kesik koni şeklinde bir yığın oluşturularak, mala ile ikiye bölünür. Eğer yan yüzeyler kendilerini tutarsa, agreganın hala ıslak olduğu anlaşılır ve kurutma işlemi devam ettirilir. Bu işlem, yüzeyler tamamen kuruyana kadar tekrarlanır. Doymun kuru yüzeye sahip numune piknometre içerisine konularak tartılır (Wdky). Agregada dolu piknometreye, numunenin üstünü kaplayacak kadar su eklenir. Numune ve su dolu piknometre 15-20 dakika boyunca sallanarak içindeki hava kabarcıklarının karışımından uzaklaşması sağlanır. Piknometre çizgisine kadar eksilen su miktarı ilave edilerek ağırlık ölçülür (W₁). Tartılan numune piknometreden çıkarılır, bir tepsiye boşaltılır ve 110±5°C’de kuruyana kadar bırakılır. Kuruyan numuneler (W_{kuru}) tartılır (Selman, 2015; Durmaz, 2024). İnce agregaların özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri, Denklem (3.2), Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) kullanılarak Denklem (3.5), Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlığı} = \frac{E_1}{(B_1 - C_1) - (E_1 - E_1)} \quad (3.5)$$

$$\text{Zahri Özgöl Ağırlık} = \frac{E_1}{(B_1 + E_1 - D_1)} \quad (3.6)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{(C_1 - A_1 - E_1)}{E_1} \times 100 \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemde; E_1 : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g), B_1 : Numunenin DKY durumdaki ağırlığı (g), C_1 : Ölçü kabı + Su + Numune ağırlığı (g), D_1 : 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı (g).

3.2.1.3. Mineral filler özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-7)

Mineral fillerlerin zahiri özgül ağırlıkları, ASTM C 854 yöntemine göre belirlenir. Deney aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

- Filler Malzemesinin Kurutulması: Filler malzemesi, $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulur.
- Piknometre Hazırlığı: Kurutulan filler malzemesi, piknometreye dökülür. Piknometre, içeriğinin yaklaşık üçte biri kadar dolacak şekilde ayarlanır ve ağırlığı ölçülür (C_f).
- Piknometrenin Vakum İşlemi: Piknometre, en az 5 dakika süreyle, yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan bir desikatörde bırakılarak havasının alınması sağlanır.
- Piknometrede Su Doldurulması: Havası alınmış piknometre, yarısına kadar suyla doldurulur ve en az 60 dakika süreyle, $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de su banyosunda bekletilir.
- Filler Malzemesinin Tartılması: Bekletilen piknometre, filler malzemesiyle tamamen suyla doldurulur ve ağırlığı ölçülür (D_f).
- Zahiri Özgül Ağırlık Hesaplaması: Filler malzemenin zahiri özgül ağırlığı, aşağıdaki Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanır (Selman, 2015; Durmaz, 2024).

$$\text{Zahri Özgül Ağırlık} = \frac{(C_f - A_f)}{(B_f - A_f) - (D_f - C_f)} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemde; A_f : elek üstünde kalan malzeme oranı (%), B_f : elek üstünde kalan malzeme miktarı (gr), C_f : Toplam numune miktarı (gr), D_f : filler malzemesinin miktarı (gr).

Bu deney, filler malzemesinin yoğunluğunu belirlemek ve asfalt karışımlarının performansını etkileyen dolgu malzemesinin kalitesini değerlendirmek için önemlidir.

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

Bir agregası, genellikle sert, dayanıklı, homojen, temiz ve yüksek aşınma direncine sahip olmalıdır (Teymen, 2019; Durmaz, 2024). Agregaların özellikleri, laboratuvar ortamında yapılan testlerle belirlenir. Yapılan çalışmalarda agregaların zaman içinde önemli ölçüde aşınma ve yıpranma yaşadığı gözlemlenmiştir. Özellikle bina ve otoyol projelerinde kullanılan agregaların, toprak yüzeyinin üst katmanlarından alt katmanlarına yük taşıma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Aşınmaya ve cilalanmaya karşı direnç göstermeyen agregalar, erken yapısal bozulmalar ve kayma direncinin kaybolmasına yol açabilir. Aşınmaya karşı düşük direnç, BSK üretimi sırasında çevre sorunlarına ve karışım kontrol problemlerine neden olabilen aşırı toz üretimine yol açabilir. Los Angeles aşınma testi, çelik bilyelerle birlikte dönen bir tambura yerleştirilen iri agregaların bozunmasını ölçer. Tambur dönerken, agregası diğer parçacıklar ve çelik bilyelerle çarpma yoluyla bozulur. Test sonunda, daha küçük boyutlara ayrılan agreganın kütlesi, toplam agregası kütlesinin yüzdesi olarak hesaplanır. Angeles Aşınma kaybı değerleri, agreganın sertliğini ve aşınmaya karşı dayanıklılığını gösterir. Test öncesinde agregası numuneleri yıkanır ve 110°C (±5) etüvde kurutulmaya bırakılır. Kuruyan numunelerin kütlesi ölçülür. Aşındırma için kullanılan bilyeler ve agregalar Los Angeles Aşınma makinesine yerleştirilir, tamburun kapağı kapatılır. Makineye 45-49 mm çapında ve 400-445 gr ağırlığında 11 adet bilye eklenir. Tambur dakikada 31-33 devirle 500 devir yapacak şekilde döndürülür. İşlem bittikten sonra numuneler tamburdan çıkarılır ve 1.6 mm elekten elenir. Elek üzerindeki agregası kütlesi ölçülür. Aşınma yüzdesi, aşağıdaki Denklem (3.9) ile hesaplanır (Selman, 2015; Durmaz, 2024).

$$\text{Aşınma Yüzdesi} = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemde; M_1 : Numunenin ilk ağırlığı (gr), M_2 : Numunenin son ağırlığı (gr).

3.2.1.5. Metilen mavisi deneyi (TS EN 933-9)

Bu deney, agrega karışımındaki kil ve silt oranını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Karışımındaki kil ve silt, metilen mavisini emen maddeler olduğundan, metilen mavisi çözeltisinin miktarı ile ilişkilidir. Eğer agrega karışımında kil ve silt oranı yüksekse, metilen mavisi değeri de yüksek olacaktır (Karacasu, 2021; Durmaz, 2024).

Deneyin başlangıcında, metilen mavisi çözeltisi hazırlanır. 1000 gram saf suya 10 gram metilen mavisi tozu eklenir ve çözeltinin homojen olması için 600 devir/dakika hızında 45 dakika boyunca karıştırılır. Çözeltinin karıştırılması işlemi tamamlandıktan sonra 24 saat bekletilir ve çözeltinin kullanım süresi 28 gün olarak belirlenir. Deney için, 2 mm'lik elekten geçen 200 gram agrega hazırlanır ve 500 gram saf su ile 600 devir/dakika hızında karıştırılır. Agrega-su karışımına 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenir ve bu karışım 400 devir/dakika hızında 1 dakika boyunca karıştırılır. Ardından, cam baget yeni karışıma daldırılır ve filtre kağıdına 1 damla damlatılır. Metilen mavisi çözeltisi eklenerek damlatma işlemi, her 5 ml çözeltisi eklendiğinde tekrar edilir. Filtre kağıdında renk değişikliği (hale oluşumu) gözlemlendiğinde, çözeltinin eklenmesi sonlandırılır ve hesaplamalar yapılır (Karacasu, 2021; Durmaz, 2024).

Metilen mavisi deney sonucu aşağıdaki Denklem (3.10) ile hesaplanmıştır;

$$MB = \frac{(V_1)}{M_1} \times 10 \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemde; MB: Metilen mavisi miktarı (gr/gr), V_1 : Enjekte edilen metilen mavisi toplam miktarı (ml), M_1 : Agrega miktarıdır.

3.2.1.6. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık testi ($MgSO_4$) (TS EN 1367-2)

Magnezyum sülfat deneyi, agregaların magnezyum sülfat çözeltisinde don kaybını belirlemek amacıyla TS EN 1367-2 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilir ve şu adımlarla yapılır:

- Numune Hazırlığı: Laboratuvar örneği olarak, 10 mm ile 14 mm arasında dane büyüklüğüne sahip agregalardan yeterli miktarda numune seçilir. Bu numuneler TS EN 932-2 (1999) standardına uygun olarak azaltılır ve yaklaşık 500 gram kütleinde deney numunesi hazırlanır. Numuneler, $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 ± 1 saat kurutulur ve ardından desikatörde laboratuvar sıcaklığına getirilir.

Magnezyum Sülfat (MgSO_4) Çözeltisinin Hazırlanması: Doymuş magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanır ve çözeltinin konsantrasyonu, belirlenen standartlara uygun olmalıdır.

- Numunelerin Çözeltiye Maruz Bırakılması: Hazırlanan numuneler, iki tel sepete yerleştirilir ve her sepet dikkatlice daldırılarak 20 mm'lik çözeltiye kaplanacak şekilde doymuş magnezyum sülfat çözeltisine 17 ± 0.5 saat boyunca daldırılır. Sepetler arasındaki yığılmalar engellenmeli ve her sepetin kenarları arasında en az 20 mm açıklık bırakılmalıdır. Daldırma işlemi tamamlandıktan sonra sepetler çözeltiden çıkarılır, süzülür ve kurutulur. Sonrasında numuneler 5 ± 0.25 saat boyunca laboratuvar sıcaklığında soğutulur.
- Daldırma İşleminin Tekrarlanması: Çözelti, her daldırma işlemi öncesinde tabanda biriken tuz çökeltilerinden arındırılır. Çözelti karıştırılır ve 30 dakika bekletilir. Çözeltinin yoğunluğu, belirlenen aralıkta olmalıdır. Eğer yoğunluk uygun değilse, taze doymuş magnezyum sülfat çözeltisi eklenir ve bu işlem 48 ± 2 saat boyunca 5 kez tekrarlanır.
- Numunelerin Temizlenmesi ve Kurutulması: Deneyin tamamlanmasının ardından, numuneler soğutulup, her bir sepetteki agregaların magnezyum sülfattan arındırılması için musluk suyuyla yıkanır ve kurutulur. Numune, 10 mm'lik elek yardımıyla elenir ve elek üstünde kalan agreganın kütlesi (M_2) 0.1 gram doğrulukla kaydedilir. Magnezyum sülfat kaybı (MS) kütlece yüzde olarak, aşağıdaki Denklem (3.11) ile hesaplanır (Anonim, 2020):

$$MS = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 10 \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemde; MS: Magnezyum sülfat değeri (gr), M₁: Deney numunesinin ilk kütlesi (gr), M₂: Deneyden sonra 10 mm'lik elekte kalan agreganın nihai kütlesi (gr).

3.2.1.7. Yassılık indeksi deneyi (TS EN 933-3)

Yassı agregaların, trafik yükleri altında kolayca kırılabilmesi bilindiğinden, bitümlü temel tabakası (BSK) için agregalarda yassı agregaların oranı belirli bir değerin üzerinde olmamalıdır. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) gereği, bitümlü temel tabakasındaki yassılık indeksi maksimum %30 olarak belirlenmiştir (KTŞ, 2013).

Elastik yol üstyapılarında ise agreganın şekli, belirli bir yassılık değerini aşmamak şartıyla genellikle önem taşımaz. Yassı agregaların kabul edilebilmesi için, kalınlıklarının nominal boyutlarının %60'ından daha küçük olması gerekmektedir. Yassılık indeksi testi, agregaların yassılık değerini belirlemek amacıyla özel elekler kullanılarak gerçekleştirilir ve BS812 standardına uygun şekilde yapılır.

Deneyde, üstyapı tabakasındaki agregalar farklı tane çaplarına sahip olabileceğinden, her elek aralığı için standartlarda belirtilen miktarlarda numune alınır. Alınan numuneler, kendi tane çapını gösteren açıklıklardan geçirilerek yassılık indeksi şablonunda değerlendirilir. Geçen ve geçmeyen numunelerin ağırlıkları her elek aralığı için kaydedilir. Toplam malzeme ağırlığı (G₁) ve yassı malzeme ağırlığı (G₂) belirlendikten sonra, yassı dane yüzdesi (YSY) Denklem (3.12) ile hesaplanır (Anonim, 2020):

$$YSY = \frac{G_2}{G_1} \times 10 \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemde; G₁: Toplam malzeme ağırlığı, G₂: Yassı malzeme ağırlığıdır.

Her elek aralığına ait düzeltilmiş yassı dane yüzdesi toplamaları, incelenen üstyapı tabakasının yassılık indeksi değerini verir.

3.2.2. Bitüm modifikasyonu

Modifiye bitümler, asfalt karışımlarının uzun dönem performansını artıran ve kaplama bozulmalarını azaltan önemli bir bileşendir. Bu tür bitümlerin üretiminde farklı modifikasyon katkıları kullanılabilir de, polimerler genellikle en çok tercih edilen katkı maddelerinin başında yer almaktadır. Polimer modifikasyonu, bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştiren etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Polimer modifiye bitüm kullanımıyla asfalt kaplamanın yorulma direnci artar, aynı zamanda çatlama ve tekerlek izi oluşum potansiyeli azalır. Polimer katkı maddeleri, elastomerik polimerler ve plastomerik polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Elastomerik polimerler, stiren/bütadiyen ve doğal veya kırıntı kauçukları içerirken, plastomerik polimerler arasında polipropilen ve polietilen gibi polimerler bulunmaktadır. Asfalt kaplama performansının iyileştirilmesinde, stiren-bütadiyen-stiren (SBS) ve etilen vinil asetat (EVA) gibi elastomerik ve plastomerik polimerler en çok tercih edilen seçeneklerdir (İskender ve Aksoy, 2021).

3.2.3. Bitüm deneyleri

Bitüm deneyleri, bitümün kalitesini değerlendirmek, özelliklerini belirlemek ve asfalt karışımlarının performansını öngörmek için yapılır. Penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası ve parlama noktası gibi deneyler, bitümün fiziksel, kimyasal ve reolojik özelliklerini ölçer ve standardize edilmiş yöntemlerle gerçekleştirilir.

3.2.3.1. Penetrasyon deneyi (TS EN 1426)

Penetrasyon deneyi, bitümün kıvamını belirlemek için yapılan bir testtir. Bu testte, belirli bir sıcaklıkta (25°C) ve belirli bir süre boyunca 100 gram ağırlığında bir iğne, bitüm yüzeyine dik olarak üç ayrı noktaya uygulanır. Uygulama noktaları, birbirinden 1 cm uzaklıkta olacak şekilde düzenlenir (Şekil 3.6). İğnenin bitüme batma derinliği, penetrasyon değeri olarak adlandırılır ve genellikle 10-1 mm biriminde ifade edilir.

Deney sırasında sıcaklık ve süre, standartlara uygun şekilde tutulur. Penetrasyon değeri, bitümün karşı gösterdiği direnci ve sertliğini temsil eder. Yumuşak bir bitüm, daha yüksek bir penetrasyon değerine sahip olurken, sert bir bitüm daha düşük bir penetrasyon değeri gösterir.

Penetrasyon deneyi, asfalt karışımının performansını etkileyen bitüm özelliklerini anlamak için önemlidir. Bu deney, asfalt üreticileri ve kullanıcıları için doğru kıvamı elde etmek, uygun asfalt malzemelerini seçmek ve asfaltın dayanıklılığını optimize etmek adına rehberlik sağlar (Gezer, 2009).

3.2.3.2. Düktilite deneyi (ASTM D113)

Düktilite, standardize edilmiş bir kalıp içine yerleştirilen bitümün, 25°C sıcaklıkta ve 5 cm/dak hızında gerilmeye tabi tutulduğunda kopana kadar uzama miktarını ifade eder. Bu test, bitümün elastik deformasyon kabiliyetini ve karışımların dayanıklılığını ölçmek için kullanılır. Düktilite değeri, bitümün kopmadan ne kadar uzayabileceğini gösterir ve bu özellik, karışımların kayma mukavemetini etkileyebilir.

Yüksek düktilite değeri, bitümün elastik özelliklerinin iyi olduğunu ve asfaltın aşınmaya karşı dayanıklı olacağını gösterirken, düşük düktilite değeri, bitümün kırılgan olduğunu ve karışımın performansının düşük olabileceğini işaret eder. Bu nedenle, bitümün düktilite değeri asfalt karışımının uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlamak için önemli bir parametredir (Köfteci, 2017).

3.2.3.3. Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427)

Yumuşama noktası deneyi, TS EN 1427 standardına uygun olarak yapılan ve bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımını ölçen bir testtir. Bu deneyde, bitüm içeren pirinç halka bir sehpa üzerine yerleştirilir ve su banyosuna alınarak sıcaklık belirli bir hızda artırılır. Sıcaklık ve basınç etkisiyle bitüm yumuşar ve bir bilye bitümün içine düştüğünde, cihazdan okunan sıcaklık değeri bitümün yumuşama noktasını belirler.

Yumuşama noktası, bitümün sıcaklık duyarlılığını ve performans özelliklerini gösterir. Bitümün hangi sıcaklık aralığında tutarlılığını ve kararlılığını koruyacağı bu test ile

belirlenir. Bu değer, bitümün uygun iklim koşullarında ne kadar dayanıklı olacağına dair önemli bilgiler sağlar. Daha yüksek yumuşama noktasına sahip bitümler, sıcak iklimlerde daha dayanıklı olup, daha düşük yumuşama noktasına sahip bitümler ise soğuk iklim koşullarında daha iyi performans gösterebilir (Tapkın, 1998).

3.2.3.4. Parlama noktası deneyi (TS EN ISO 2719)

Parlama noktası, bir maddenin buharının alevle temas ettiğinde geçici olarak parladığı, ancak yanmaya devam etmediği sıcaklık değerini ifade eder. Bu özellik, özellikle bitümlü bağlayıcıların ısıtılması sırasında tutuşma ve alev alma risklerini belirlemek açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bitümlü bağlayıcılar farklı türlerde bulunur, örneğin asfalt çimentoları ve sıvı petrol asfaltları gibi. Her bir tür için parlama noktası belirleme yöntemleri farklıdır. Asfalt çimentoları ve SC sıvı petrol asfaltları için Cleveland Açık Kabı yöntemi, MC ve RC sıvı petrol asfaltları için ise Tagliabue Kapalı Kabı yöntemi kullanılır (15-74°C aralığı için).

Parlama noktası testi, bitümlü bağlayıcıların güvenli bir şekilde depolanmasını, taşınmasını ve uygulanmasını sağlamak için önemlidir. Bu test, iş güvenliği açısından tutuşma ve yanma risklerini belirler. Düşük bir parlama noktası, bitümlü bağlayıcının daha düşük sıcaklıklarda kolayca tutuşabileceğini gösterirken, yüksek bir parlama noktası daha yüksek sıcaklıklarda yanma olasılığının düşük olduğunu belirtir.

Sonuç olarak, parlama noktası testi, bitümlü bağlayıcıların güvenli kullanımını sağlamak için önemli bir parametredir. Bu test, yanma riskini azaltmaya ve güvenli çalışma koşullarını sağlamaya yardımcı olur (Orhan, 2012).

3.2.3.5. Elastik geri dönme deneyi (TS EN 13398)

Bu metot, bitümlü bağlayıcıların elastik geri dönüş özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan bir testtir. Test, 25°C deney sıcaklığında bir düktilimetre kullanılarak gerçekleştirilir. Deneyde, bitümlü bağlayıcı numunesi, 25°C sıcaklıkta ve 50 mm/dak

hızla, önceden belirlenen 200 mm uzama miktarına kadar uzatılır. Bitüm numunesi, iplik şeklinde elde edilir ve bu iplik ortasından kesilerek iki eşit parçaya ayrılır.

Testin ardından, bu yarım parçalar 30 dakika bekletilir ve her bir parçanın kısalması, uzama uzunluğunun yüzdesi olarak ölçülür. Bu ölçümler, bitümlü bağlayıcının elastik geri dönüş kapasitesini ve malzemenin geri elastik özelliklerini belirlemeye yardımcı olur (Yüknü vd., 2021).

3.2.3.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi (TS EN 12607-1, AASHTO T240, ASTM D2872)

RTFO (Rolling Thin Film Oven) deneyi, bitümlü bağlayıcıların kısa dönemli yaşlanma özelliklerini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu deney, bitümlü bağlayıcıların depolanma, plente aktarılma, karıştırılma, taşınma, serilme ve sıkıştırılma süreçlerinde yaşadığı fiziksel değişiklikleri incelemek amacıyla yapılır.

RTFO deneyinde, dairesel, dikey ve kendi eksenini etrafında dönen 8 adet numune şişesinin bulunduğu bir taşıyıcı kullanılır. Her bir şişeye 35 gram bitüm konur ve taşıyıcı ile birlikte dönerken şişeler, etüvdeki en alt konumlarına geldiklerinde hava üfleyici bir parça ile sırayla her bir şişenin içerisine hava püskürtülür. Numuneler, 163°C sıcaklıkta ve 85 dakika süreyle yaşlandırılır. Bu süreç, bitümlü bağlayıcının işlenme ve kullanım sırasında maruz kaldığı yaşlanmayı simüle eder ve bitümün zamanla gösterdiği fiziksel değişiklikleri anlamaya yardımcı olur (Sağlık vd., 2012).

3.2.3.7. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) (TS EN 14769, AASHTO R 28)

Superpave Bağlayıcı Şartnamesi, asfalt kaplamaların uzun ömürlü ve dayanıklı olabilmesi için bitümlerin orta ve düşük sıcaklıklarda, özellikle yorulma ve termal çatlaklara karşı dayanıklılığını test etmektedir. Bu testler, bitümlerin oksidasyonu nedeniyle ortaya çıkan uzun dönemli yaşlanmayı simüle eder. Superpave sisteminde bu tür yaşlanma, Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV - Pressure Ageing Vessel) kullanılarak gerçekleştirilir ve bitümde meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişiklikler bu yöntemle incelenir.

Deney sırasında, RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) ile yaşlandırılmış numuneler, her biri 50 gram olacak şekilde numune kaplarına konur. Numune kapları, raflı numune taşıyıcıya yerleştirilir ve daha sonra Basınçlı Yaşlandırma Kabı'na alınır. Burada, numuneler 2070 kPa basınç altında, bitümün performans sınıfına bağlı olarak 90°C, 100°C veya 110°C sıcaklıkta 20 saat süreyle yaşlandırılır. Bu işlem, asfalt kaplamaların yapım ve kullanım sırasında karşılaştıkları çevresel koşulları simüle ederek, bitümün dayanıklılığını ve uzun dönemli performansını değerlendirmeye yardımcı olur (Sağlık vd., 2012).

3.2.3.8. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi (TS EN 14770, AASHTO T315)

Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi, bitümlü bağlayıcıların visko-elastik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan bir testtir. Bu deney, bitümün yüksek sıcaklıklarda ve yük altında nasıl bir performans sergilediğini ölçer ve asfaltın yorulma, kalıcı deformasyon ve diğer kritik performans kriterlerini değerlendirir. Bu test, özellikle yüksek sıcaklık performans sınıfının belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

Deneyde, numune, biri sabit diğeri ise hareketli (salınım yapan) iki disk arasına yerleştirilir. Hareketli disk, numuneye salınımlı kesme kuvveti uygular ve bu kuvvet karşısında numunenin gösterdiği reolojik özellikler ölçülür. DSR deneyinde, bitümün kompleks kayma modülü (G)* ve faz açısı (δ°) ölçülür.

- Kompleks kayma modülü (G)*: *Bu değer, bitümün sürekli ve tekrarlayan kesme gerilmelerine karşı gösterdiği dirençtir. Yüksek G değeri, bitümün deformasyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir.*
- Faz açısı (δ°): Bu, uygulanan kesme gerilmesi ile oluşan deformasyon arasındaki zaman farkını gösterir. Faz açısı, bitümün elastik ve viskoz deformasyon özelliklerinin oranını yansıtır.

Test sırasında uygulanan salınımlı kesme kuvvetinin frekansı saniyede 10 radyan (1.59 Hz) olup, bu hız, yaklaşık 90 km/saat hızındaki trafik koşullarındaki deformasyonları temsil eder. Bu test, asfalt karışımının yüksek sıcaklık altındaki dayanıklılığını anlamak için önemlidir (Sağlık vd., 2012).

3.2.3.9. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi (TS EN 14771)

Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyi, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıklarda rijitlik ve sünme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan bir testtir. Bu parametreler, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımını değerlendirmede önemli bir rol oynar. Özellikle Superpave deneylerinde olduğu gibi, bu testte de bitümlü bağlayıcının kullanılacağı bölgedeki tahmin edilen gerçek sıcaklık değerleri deney sıcaklığı olarak alınır.

Deneyde, belirli boyutlarda hazırlanan bitüm kirişi numunesi, bilgisayar kontrollü bir sistemle 4 dakika boyunca sabit bir yükü gerilir. Bu süre zarfında, zaman-deformasyon ve zaman-sünme sertliği grafikleri çizilir. Bu grafikler, bitümlü bağlayıcının termal çatlak oluşumuna karşı nasıl bir direnç gösterdiğini ölçmek için kullanılır.

Test, genellikle negatif sıcaklıklarda gerçekleştirilir, çünkü bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışını ve çatlama riskini ölçmek amaçlanır. Deneyin sonunda, sünme sertliği ($S(t)$) 300 MPa'dan küçük olmalı ve m-değeri 0.300'ün üzerinde olmalıdır. Bu, bitümün düşük sıcaklıklarda çatlama riski taşımadan performans göstermesini sağlayacak özelliklere sahip olup olmadığını gösterir (Sağlık vd., 2012).

3.2.4. Bitümlü sıcak karışım deneyleri

BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) performans deneyleri, asfalt karışımlarının mukavemetini, elastisitesini, dayanıklılığını ve diğer önemli performans özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılan laboratuvar ve saha testleridir. Bu deneyler, asfalt karışımının tasarım aşamasında veya üretim sonrası kalite kontrol için gerçekleştirilir. Bu sayede, asfalt karışımının beklenen trafik yükleri ve çevresel koşullar altında nasıl bir performans göstereceği belirlenebilir.

Bazı yaygın kullanılan BSK performans deneyleri şunlardır:

1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi: Asfalt karışımının mekanik özelliklerini ölçmek için yapılan bir testtir. Karışımındaki stabilite (dayanıklılık) ve akma (plastik deformasyon) kapasitesini belirler.
2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS): Uzun süreli yükler altındaki stabiliteyi ölçer ve asfalt karışımının kalıcı deformasyonlara karşı ne kadar dirençli olduğunu belirler.
3. Donma-Çözülme Çevriminden Sonra Marshall Stabilite Deneyi: Asfaltın donma-çözülme çevrimleri sonrası mukavemetini test eder. Bu test, suya ve donma etkilerine karşı dayanıklılığını belirler.
4. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi (ITS): Bu test, asfalt karışımının çekme dayanımını ölçerek, karışımın gerilme altında nasıl davrandığını gösterir.

Nem Hassasiyeti (Su Hasarı Direnci) Deneyi: Su ile temasa geçen asfalt karışımının dayanıklılığını test eder. Su hasarına karşı dirençli olup olmadığını belirler.

Bu deneyler, bitümlü sıcak karışımın performansını optimize etmek ve asfalt karışımının beklenen koşullar altında uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlamak için kritik veriler sağlar. Eğer gerekli ise, bu testler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda düzeltici önlemler alınabilir (Timori ve Tığdemir, 2022).

3.2.4.1. Marshall stabilite ve akma deneyi (TS EN 12697-34)

BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) asfalt beton kaplama, hava boşlukları dahil olmak üzere bir asfalt bağlayıcı ile tutulan derecelendirilmiş agrega kayalarından oluşan bir kompozit malzemedir. Bu karışım, asfalt bağlayıcı ve agrega malzemelerinin birleşimiyle esnek bir kaplama yapısı oluşturur. BSK'lar, özellikle yol ve havaalanı kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bir malzeme olup, yapıların dayanıklılığını artırır ve trafik yüklerine karşı performans sağlar.

BSK karışımının özellikleri, kullanılan bileşenlerin kalitesine ve doğru seçilmesine bağlıdır. Karışımındaki ince ve kaba agregaların oranları, bağlayıcı bitümün özellikleri gibi faktörler, karışımın dayanıklılığını, elastikiyetini ve sıcaklık dayanımını doğrudan etkiler.

Başlangıçta havaalanı kaplamaları için geliştirilen Marshall karışım tasarım yöntemi, zamanla otoyol kaplamaları için de uygulanmaya başlanmıştır. Marshall karışım tasarımı yöntemi, karışımın uygunluk ve stabilitesini test etmek amacıyla kullanılan bir test metodudur. Yöntemin basitliği, onu Superpave tasarım sisteminin tanıtılmasından önce Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın bir seçenek haline getirmiştir. Halen dünya çapında en sık kullanılan karışım tasarım yöntemi olma özelliğini taşır (Terzi vd., 2013).

Marshall yöntemi, asfaltın bağlayıcı özellikleri ve agrega malzemelerinin karışım içerisindeki uygun oranları hakkında önemli bilgiler sağlar, bu da asfalt kaplamaların performansını optimize etmek için kritik bir faktördür.

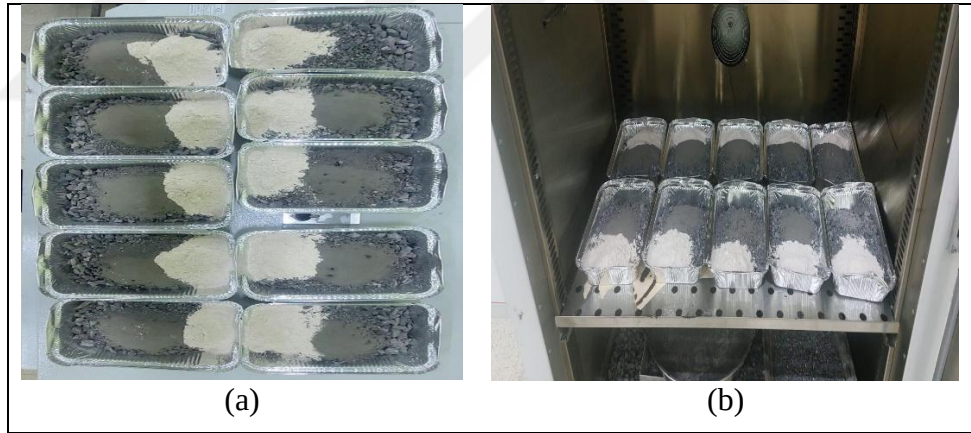
Bir BSK'nın stabilitesi, asfalt karışımının dayanıklılığı ve performansı açısından kritik bir parametre olup, özellikle aşınma tabakasının tasarımında önemli bir yer tutar. Stabilite, kaplamanın trafik yüklerine karşı koyma yeteneğini belirler; yani, tekerlek izlerine ve itme etkilerine karşı direnç göstermesini sağlar. Stabilite eksikliği, yol yüzeyinin zamanla çözülmesine ve akmasına neden olabilir. Bu, yolun güvenliğini ve dayanıklılığını ciddi şekilde tehlikeye atar.

Akış, stabilitenin ters bir özelliği olup, kaplamanın trafik yükleri altında deformasyona uğramadan uyum sağlama yeteneğini temsil eder. Bu özellik, asfaltın esnekliğini ve yol yüzeyinin uzun vadeli davranışını belirler. Stabilite ve akış arasındaki denge, BSK'nın plastik ve elastik özelliklerini önemli ölçüde etkiler ve bu denge, kaplamanın dayanıklılığı ve performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

Marshall Katsayısı (MQ), bitümlü beton karışımının stabilitesini ve akış özelliklerini değerlendiren bir ölçüdür. MQ, karışımın sertliği ve dayanıklılığını belirlerken, stabilitenin akışa oranını da ölçer. Bu oran, malzemenin kesme gerilmesi, kalıcı deformasyon ve tekerlek izi gibi çeşitli gerilim biçimlerine karşı direncini belirler. Mühendisler, bu katsayıyı analiz ederek bitümlü betonun kalitesi hakkında değerli bilgiler edinir ve karışımın bileşimini optimize ederek, asfaltın uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar (Aksoy vd., 2012).

Marshall tasarım deneyleri, asfalt karışımındaki ideal bitüm miktarını belirlemek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu deneyin amacı, asfalt karışımının yeterli performansı sağlaması için gerekli olan bitüm oranını optimize etmektir. Bu deneyde, 1050 g kuru agrega karışımı alınarak 160°C'ye kadar ısıtılır. Agregası, bu sıcaklıkta iyice karıştırılır ve merkezinde bir çöküntü veya "krater" oluşturulur. Ardından, 160°C'ye ısıtılmış 50/70 penetrasyon dereceli bitüm eklenir. Agregası ve bitüm karışımı, bitümün agrega taneciklerini tamamen kaplayacak şekilde karıştırılır (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).

Sonraki adım, agrega ve bitüm karışımını 160°C'ye ısıtılmış kalıp düzeneği ile sıkıştırma işlemidir. Bu işlem, karışımın homojen bir şekilde sıkıştırılmasını sağlayarak, ideal asfalt miktarını belirlemeye yardımcı olur. Bu testin sonunda, bitümün optimum miktarı, karışımın en uygun performansı göstereceği şekilde belirlenir. Marshall tasarım yöntemi, asfaltın dayanıklılığını, stabilitesini ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Ogundipe, 2016).



Şekil 3.6. Agregası karışımı (a) ve etüv işlemi (b)

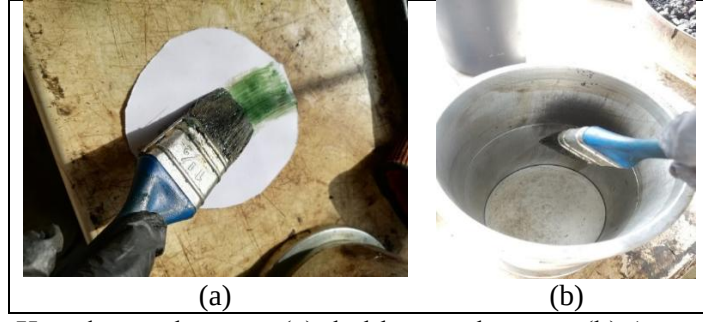


Şekil 3.7. Sıcak bitüm ve agreganın karışımı

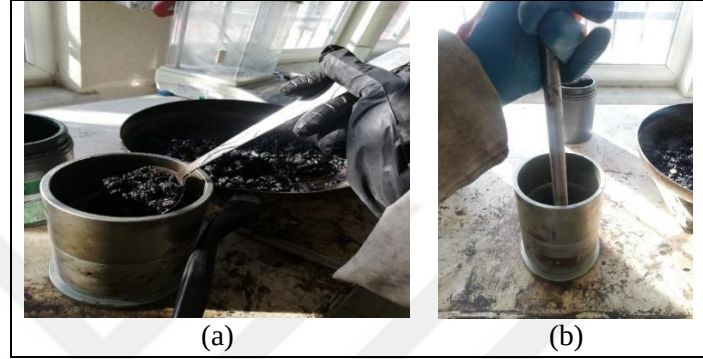
Marshall tasarım deneyinde sıkıştırma işlemi, asfalt karışımının uygun şekilde hazırlanabilmesi ve doğru sonuçların elde edilmesi için dikkatlice yapılması gereken bir adımdır. Numune hazırlanırken, kalıbın altına filtre kağıdı yerleştirilir ve kenarlar, karışımın kalıba yapışmasını önlemek amacıyla gres yağı ile yağlanır. Ardından, ısıtılmış agrega ve bitüm karışımı dikkatlice kalıba dökülür ve karışımın üçte biri kadar döküldükten sonra tokmak yardımıyla sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi, doğru ve tutarlı sonuçlar elde edebilmek için oldukça önemlidir, bu nedenle karışımın sıcaklığının 150°C'de tutulması sağlanır.

Sıkıştırma işlemi sonrasında, karışımın yüzeyi düzleştirilir ve numune bir mala ile yuvarlak bir şekil alacak şekilde şekillendirilir. Numune, daha sonra kalıp düzeneğine yerleştirilir ve 75 kez darbe uygulanarak sıkıştırılır. Bu işlem numunenin sıkı bir şekilde sıkıştırılmasını sağlar. İşlem tamamlandıktan sonra, numune dikkatlice kalıptan çıkarılır, düz bir yüzeye yerleştirilir ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.

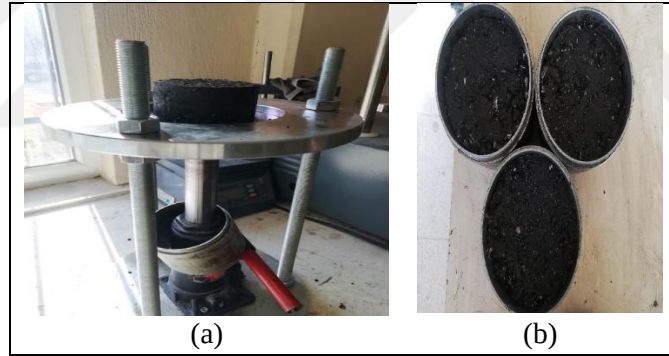
Hazırlanan numuneler, belirli testlere tabi tutulur. Bu testler arasında yoğunluk, boşluk oranları, stabilite ve akma testleri bulunur. Bu testler, numunenin performansını ölçmek ve asfalt karışımının uygunluğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilir (Ogundipe, 2016; Yang vd., 2018).



Şekil 3.8. Kağıdın yağlanması (a), kalıbın yağlanması (b) (Durmaz, 2024)



Şekil 3.9. Numunenin kalıba aktarılması (a), tokmak işlemi (b) (Durmaz, 2024)



Şekil 3.10. Kriko yardımıyla çıkarılma işlemi (a) Numuneler (b) (Durmaz, 2024)

Marshall testi, asfalt karışımının stabilitesini ve akma değerini belirlemek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu test, numunelerin belirli koşullar altında sıkıştırılması ve ardından çeşitli yükleme koşullarında test edilmesi ile yapılır. Numuneler, 102 mm çapında ve 64 mm yüksekliğinde silindirik kalıplarda hazırlanır. Numuneler, standart bir sıkıştırma çekici ile sıkıştırılır. Bu çekici, 45.72 cm yükseklikten bırakılan 4.53 kg ağırlığında bir darbe ile uygulanır. Sıkıştırma işlemi sırasında, lastik basıncına bağlı olarak darbe sayısı belirlenir. Örneğin, düşük lastik basıncı olan yollarda her iki yüzeye 50 darbe, 200 psi lastik basıncı olan yollarda ise 75 darbe uygulanır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler 60°C'de, 50.8 mm/dakika sabit hızla test edilir. Test sırasında numunenin üst ve alt kısımları serbest

bırakılır, bu da gerilme dağılımının karmaşık olmasına neden olur. Yükleme düzeneği, numunenin belirli bir bölümünü sınırlar ve böylece test sırasında numuneye uygulanan gerilimlerin dağılımı ve deformasyonu daha doğru bir şekilde ölçülür (Kuloğlu, 2006).

Marshall tasarım prosedürünün temel amacı, asfalt karışımının performansını en iyi şekilde optimize edecek en uygun bitüm içeriğini belirlemektir. Bu, asfalt karışımının stabilitesini, akma değerini ve boşluk oranlarını değerlendirerek yapılır. Tasarımcı, aşağıdaki test özellik eğrilerine bakarak doğru bitüm içeriğini belirler:

1. **Stabilite (Stability):** Bu, karışımdaki bitüm miktarına bağlı olarak, numunenin tekerlek izi ve diğer dış etkilere karşı dayanıklılığını gösteren bir parametredir. Yüksek stabilite, karışımın trafik yüklerine karşı dayanıklı olduğunu gösterir.
2. **Akma (Flow):** Bu parametre, numunenin stabiliteye karşı gösterdiği plastisiteyi belirler. Akma değeri, karışımdaki bitümün ne kadar elastik ve deformasyona karşı dirençli olduğunu gösterir.
3. **Boşluklar (Void Content):** Asfalt karışımında agregaların arasındaki hava boşluklarının oranını belirtir. Bu boşluklar, suyun karışıma girip çıkmasını sağlar ve karışımın dayanıklılığı üzerinde büyük etkiye sahiptir.
4. **Boşluklar İçin Bitüm (Bitumen Content):** Asfalt karışımının toplam karışımda ne kadar bitüm içerdiği önemli bir parametredir. Yetersiz bitüm içeriği, karışımın dayanıklılığını azaltabilir, fazla bitüm ise karışımın stabilitesini etkileyebilir.
5. **Marshall Katsayısı (Marshall Quotient, MQ):** Stabiliteye karşı akma oranını gösteren bir ölçüdür. Yüksek MQ değeri, karışımın stabilitesinin iyi olduğunu, düşük değeri ise akma davranışının fazla olduğunu gösterir.
6. **Boşluklar İçin Asfalt İhtiyacı (Optimum Asphalt Content):** Bu, karışımın ihtiyaç duyduğu bitüm miktarını belirler. Doğru miktarda bitüm, karışımın dayanıklılığını ve stabilitesini artırır.

Bu değerler, tasarımcıların asfalt karışımının performansını optimize etmelerine yardımcı olur ve karışımın trafik koşullarına dayanıklı, uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlar (Tapkın vd., 2010).

TMA (Tekerlek İzi Dayanımlı Asfalt) karışımı, özellikle tekerlek izi oluşumuna karşı dayanıklı asfalt kaplamalar için tasarlanmıştır. Bu tür karışımların dizaynı, Marshall karışım tasarım yöntemine dayanır ve aşağıdaki şekilde uygulanır:

1. Marshall Numuneleri Hazırlama:

- Modifiyesiz bitüm kullanıldığında, numuneler $135\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de hazırlanır.
- Modifiye bitüm kullanıldığında ise numuneler $145\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de hazırlanır.
- Her iki yüzeye de 50 darbe uygulanarak numuneler sıkıştırılır.

2. Tekerlek İzi Dayanıklılığı: TMA karışımının en önemli özelliği, tekerlek izi oluşumuna karşı dayanıklı olmasıdır. Bu, karışımın yüksek sıcaklık altında deformasyon direncini artırarak, trafikten kaynaklanan izlerin oluşmasını engeller.

3. Bitüm Süzülme Deneyi: Schellenberg bitüm süzülme deneyi, mineral agregadan bitümün süzülme miktarını tespit etmek için yapılır. Bu test, bitümün agrega ile olan etkileşimini ve dayanıklılığını anlamaya yardımcı olur.

4. Modifiye Bitüm ve Elyaf Kullanımı:

- Karışımında kullanılan modifiye bitüm tipi, karışımın tekerlek izi karşısındaki dayanıklılığını ve diğer performans özelliklerini doğrudan etkiler. Modifiye bitümler, yüksek sıcaklık dayanımını artırarak, asfaltın uzun ömürlü olmasını sağlar.
- Ayrıca, karışımında kullanılan elyafın tipi ve oranı da dizaynda belirtilmelidir. Elyaf, bitümün viskozitesini artırarak, karışımın dayanıklılığını güçlendirir.

5. Karışım Dizayn Kriterleri: TMA karışımlarının tasarımında, Çizelge 3.8'de yer alan kriterlere uygunluk sağlanmalıdır. Bu kriterler, karışımın performansını optimize etmeyi hedefler ve genellikle karışımın stabilitesi, akma, boşluk oranları gibi parametreleri içerir.

Bu yöntemle hazırlanan TMA karışımları, özellikle yoğun trafik koşullarında, asfaltın uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamak amacıyla yüksek performanslı asfalt kaplamaları oluşturur (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.8. TMA dizayn kriterleri (KTŞ, 2013)

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, (%)		2-4	3-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)		3-4		
Agregalar Arası Boşluk (VMA), (%) min.	TİP-1	16	13	TS EN 12697-8
	TİP-2	17		
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	TİP-1	5.8	5.2	TS EN 12697-1
	TİP-2	6.5		
İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %		80	80	AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma * (30 000 devirde, 60°C’de), (%) maks.		6	6	TS EN 12697-22
Elyaf Miktarı, %		0.3-1.0	0.2-0.8	
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.		0.3	0.3	TS EN 12697-18

Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilir.

TMA (Tekerlek İzi Dayanımlı Asfalt) karışım dizaynı, geleneksel asfalt karışımlarına göre daha özel ve yüksek performanslı karışımlar üretmek amacıyla tasarlanmış bir süreçtir. Bu süreçte, birkaç kritik aşama bulunmaktadır:

1. Agregaların Seçimi: TMA karışımının başarılı olabilmesi için doğru agregası seçimi çok önemlidir. Agregası türü, karışımın dayanıklılığı, sıcaklık dayanımı ve tekerlek izi karşısındaki direnci gibi özellikleri etkiler. Agregası, tasarım kriterlerine uygun şekilde seçilmelidir.
2. Agregası Gradasyonunun Oluşturulması: Agregasının gradasyonu (tanecik boyutlarının dağılımı), asfalt karışımının dayanımını ve performansını doğrudan etkiler. TMA karışımı için belirlenen gradasyon, özellikle yüksek sıcaklıklar ve trafik yükleri altında performansını iyileştirir.
3. Optimum Bitüm Oranının Tespiti: TMA karışımının ideal performansı için, agregası karışımının içindeki hava boşluğu (V_h) ve agregası arası boşluk (VMA) şartlarına uygun optimum bitüm oranı belirlenmelidir. Bu oran, karışımın stabilitesini, akma ve deformasyon direncini optimize etmek için çok önemlidir.
4. Su Hassasiyeti ve Bitüm Süzülme Durumu: Su hassasiyeti testi, karışımın suya karşı dayanıklılığını ölçmek için yapılır. Ayrıca, bitüm süzülme durumu (bitümün agregadan süzülme miktarı) da önemli bir parametredir. Bu testlerle, bitümün ve agregasının etkileşimi ve uzun ömürlü performansı değerlendirilir.

5. Marshall Darbe Sayısı: Geleneksel asfalt karışımlarında 75 Marshall darbesi ile numuneler hazırlanırken, TMA karışımlarında genellikle 50 Marshall darbesi uygulanır. Bunun nedeni, 75 darbenin agregaların kırılmasına neden olabilmesidir. Bu sebeple birçok ülkede, TMA karışımları için 50 darbe yeterli görülmüştür. Ancak, bazı ülkeler ağır trafik hacmine sahip yollar için 75 darbe kullanımını şart koşturmaktadır.

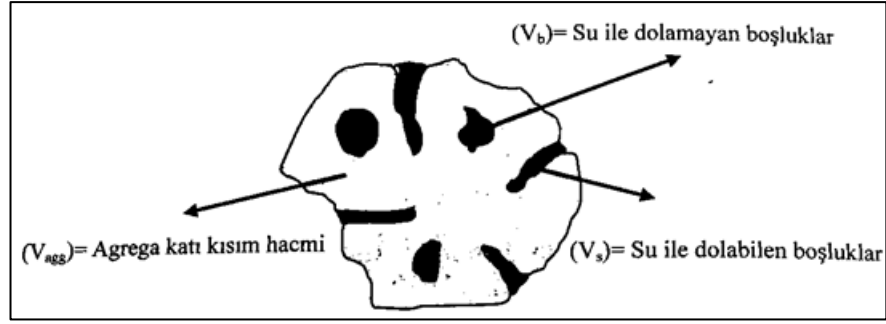
6. Marshall Stabilite Testi: TMA karışımlarında Marshall stabilite testinin sonuçları genellikle geleneksel asfalt karışımlarına göre daha düşük çıkmaktadır. Bu nedenle, yalnızca Marshall stabilitesine bakarak karışımın performansı hakkında kesin bir değerlendirme yapılmamalıdır. ABD’de, Marshall stabilitesi için belirli bir standart verilmemektedir, çünkü bu parametre yalnızca "öngörülen stabilite" olarak ele alınmaktadır.

7. Stabilizatörlerin Etkisi: Bu tezde, selüloz elyaf (SF) ve AKB (Atık Kağıt Bardak) gibi stabilizatörlerin kullanımıyla yapılan TMA karışımlarına Marshall stabilite testi uygulanmaktadır. Amaç, bu stabilizatörlerin karışıma olan etkilerini görmek ve stabilite üzerinde ne gibi farklar yarattığını belirlemektir.

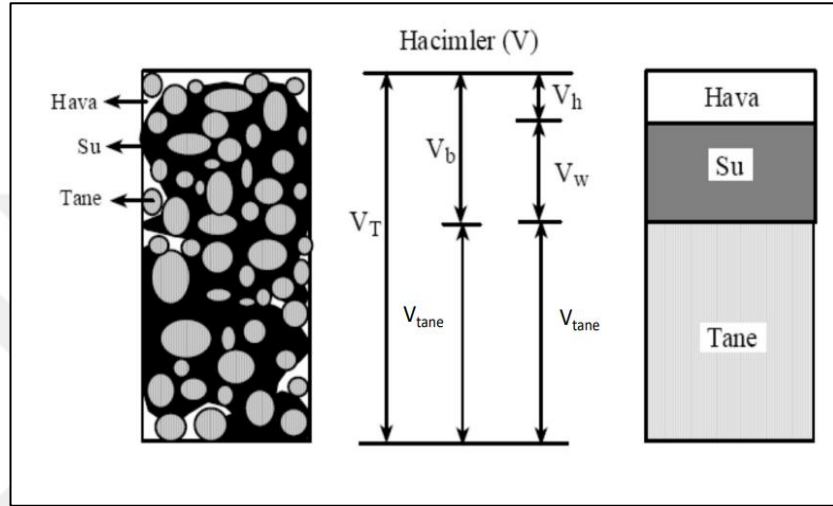
TMA karışımları için yapılan bu testler, karışımın performansını en iyi şekilde optimize etmek amacıyla çeşitli parametrelerin göz önünde bulundurulmasını sağlar (Özdaş, 2021).

3.2.4.1.1. Yoğunluk-boşluk analizinde kullanılan bağıntılar

Marshall deneyinin hesaplamalarında kullanılan (Denklem 3.13-Denklem 3.22)’ye ihtiyaç vardır. İlk olarak, agregaların birim hacim ağırlıkları (özellik ağırlık, g/cm^3) bilinmelidir. Birim hacim hesaplamasında üç farklı özellik ağırlık kullanılır: zahiri özellik ağırlık, hacim özellik ağırlık ve efektif özellik ağırlık. Bu özellik ağırlıklar arasındaki ilişki Şekil 3.11’deki şekilde görülebilir.



Şekil 3.11. Agregat özgül ağırlık, hacim ve ağırlık kavramları (Karacasu, 2021)



Şekil 3.12. Agregat özgül ağırlık, hacim ve ağırlık modellemesi (Karacasu, 2021)

Zahiri özgül ağırlık: Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır (Karacasu, 2021).

Hacim özgül ağırlık: belirli bir sıcaklıktaki agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır (Karacasu, 2021).

Efektif özgül ağırlık: Asfalt absorbe eden boşluklar dışındaki hacimleri kapsamaktadır. Efektif özgül ağırlık kullanıldığında; agregat tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından dolayı sıkıştırılmış asfaltın boşluk hesabında en doğru sonucu vermektedir (Karacasu, 2021).

Agrega zahiri özgül ağırlık (G_{sa}):

$$G_{sa} = \left(\frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%İ}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \right) \quad (3.13)$$

$\%K$, $\%İ$, $\%F$ sırasıyla; kaba, ince, filler agregalarının ağırlıkça yüzdesi

G_{ka} , G_{ia} , G_{fa} sırasıyla; kaba, ince, filler agregalarının zahiri özgül ağırlıkları

Agrega hacim özgül ağırlık (G_{sb}):

$$G_{sb} = \left(\frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%İ}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \right) \quad (3.14)$$

$\%K$, $\%İ$, $\%F$ sırasıyla; kaba, ince, filler agregalarının ağırlıkça yüzdesi

G_{kb} , G_{ib} , sırasıyla; kaba, ince, agregalarının hacim özgül ağırlıkları

G_{fa} ; filler agregalarının zahiri özgül ağırlıkları

Agrega efektif özgül ağırlık (G_{ef}):

$$G_{ef} = \left(\frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} - \frac{W_a}{G_b}} \right) \quad (3.15)$$

W_a ; bitüm yüzdesi

G_b ; bitüm özgül ağırlığı

D_t ; gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığıdır. ASTM D 2041 deneyi ile bulunmaktadır.

Agrega tarafından absorbe edilen su hacminin absorbe edilen asfalt hacminden daha fazla olduğundan dolayı agregaların efektif özgül ağırlığı, hacim özgül ağırlığı ile zahiri özgül ağırlığı aralığında olması gerekir. Eğer bu aralıkta olmazsa efektif özgül ağırlığı deneyi yanlış yapıldığına işaret etmektedir. Bu yüzden D_t deneyi tekrar yapılarak uygun G_{ef} değerine ulaşılır. D_t deneyinin yapılmadığı durumlarda ise hacim özgül ağırlığı (G_{sb}) ile zahiri özgül ağırlığı (G_{sa}) değerlerinin ortalaması alınarak efektif özgül ağırlığı değeri bulunmaktadır. $\left(G_{ef} = \left(\frac{G_{sb}+G_{sa}}{2}\right)\right)$

Bitüm absorpsiyon yüzdesi (P_{ba}):

$$P_{ba} = \left(100 \times \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{ef}}\right) \times G_b \quad (3.16)$$

G_{ef} ; agreganın efektif özgül ağırlığı

G_{sb} ; agreganın hacim özgül ağırlığı

G_b ; bitüm özgül ağırlığı

Briketin hacmi (V):

$$V = B - C \quad (3.17)$$

B: Briketin doygun yüzey ağırlığı (g)

C: Briketin suda ağırlığı (g)

Briketin hacim özgül ağırlığı (D_p):

$$D_p = \left(\frac{A}{V}\right) \quad (3.18)$$

A = Briketin havada ağırlığı (g)

V = Briketin hacmi (cm^3)

Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (D_t):

$$D_t = \left(\frac{100 + W_a}{\left(\frac{100}{G_{ef}} \right) + \left(\frac{W_a}{G_b} \right)} \right) \quad (3.19)$$

G_{ef} ; agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b ; bitüm özgül ağırlığı

W_a ; bitüm yüzdesi

Hava boşluğu (V_h) hesabı yapılırken farklı bitüm yüzdelerinde kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı değerine ihtiyaç duyulmasından dolayı D_t hesabı yapılmaktadır.

Sıkıştırılmış kaplama karışımının agregaları arasındaki boşluk yüzdesi (VMA):

$$VMA = \left(100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \right) \quad (3.20)$$

D_p ; sıkıştırılmış kaplama karışımının hacim özgül ağırlığı (ASTM D 1188, D 2726)

G_{sb} ; agreganın hacim özgül ağırlığı

W_a ; bitüm yüzdesi

Sıkıştırılmış kaplama karışımının hava boşluğu yüzdesi (V_h):

$$V_h = \left(\frac{D_t - D_p}{D_t} \right) \times 100 \quad (3.21)$$

D_t ; kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

D_p ; sıkıştırılmış kaplama karışımının hacim özgül ağırlığı

Sıkıştırılmış kaplama karışımının asfalt dolu boşluk yüzdesi (V_{FA}):

$$VFA = \left(\frac{VMA - V_h}{VMA} \right) \times 100 \quad (3.22)$$

VMA; sıkıştırılmış kaplama karışımının agregaları arasındaki boşluk yüzdesi

V_h ; sıkıştırılmış kaplama karışımının hava boşluğu yüzdesi

3.2.4.2. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi

Optimum bitüm oranı, asfalt karışımının stabilitesini, dayanıklılığını ve mukavemetini sağlamak için gereken ideal bitüm miktarını ifade eder. Bu oran, karışımın bileşenleri ve uygulanacak çevresel koşullara göre değişiklik gösterebilir.

TMA karışımlarında optimum bitüm oranını belirlemek için genellikle hava boşluğu oranı (V_h) kullanılır. TMA karışımının her biri için, V_h %3.5 olarak seçildiğinde, elde edilen optimum bitüm oranları, bu değere karşılık gelen agregalar arası boşluk oranı (VMA) şartname limitlerini karşılar. Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KTŞ) yönetmeliğine göre, TMA aşınma tabakaları için hava boşluk oranı %2-4 (sıcak iklim bölgelerinde %3-4), Tip-1A agrega karışımlarında agregalar arası boşluk (VMA) oranı en az %16 ve bitümlü bağlayıcı oranı en az %5.8 olmalıdır (KTŞ, 2013).

Bu çalışmanın ilk aşamasında, belirlenen gradasyon sabit tutulmuş ve %5.0, %5.5, %6.0, %6.5, %7.0 PMB oranlarında ve %0.35 selülozik fiber (SF) katkısıyla 15 numune hazırlanarak optimum bitüm oranı (OBO) belirlenmiştir. İlerleyen aşamada, TMA karışımında selülozik fiber yerine farklı oranlarda (%0.15, %0.25, %0.35, %0.45) AKB ve fiber içermeyen (%0 NF) numuneler hazırlanmıştır. Her bir AKB oranı için, %5.0, %5.5, %6.0, %6.5, %7.0 bitüm içeriklerinde TMA numuneleri hazırlanmış ve her bir seri için Marshall stabilite ve akma deneyi (MS) ile optimum bitüm oranları (OBO) tespit edilmiştir.

Bu yöntemle belirlenen bitüm oranı ile üretilen sıcak asfalt karışımının belirtilen özellikleri taşınması sağlanacaktır. Sonrasında, optimum bitüm oranlarının şartnamelere uygun olarak akma ve %VMA (Agregalar arası boşluk) değerlerini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir. Bu adım, asfalt karışımının gereksinimlerini karşıladığından emin olmak için gerçekleştirilir (Gezer, 2009).

3.2.4.3. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi

ITS (Dolaylı Çekme Mukavemeti), Marshall yükleme cihazı ile dikey çap düzlemi boyunca basınç yüklerine maruz bırakılarak silindirik numunelerin mukavemetini ölçen bir yöntemdir. Bu süreç, uygulanan yükün yönüne dik olarak, düşey çap düzlemi boyunca uniform çekme gerilmeleri oluşmasına neden olur ve bu da numunenin kırılma aşamasında düşey çap boyunca yarılmasına yol açar. ITS değeri, numunenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum yük hesaplanarak Denklem (3.23) ile belirlenir (Zoorob ve Suparna, 2000). ITS testi, ASTM D6931-17:2017 standardına uygun olarak, Marshall aparatı kullanılarak 25°C’de ve 50.8 mm/dakika yükleme hızında gerçekleştirilir (Şekil 3.13).

$$\text{Dolaylı Çekme Mukavemeti} = \frac{2P_{\max}}{\pi t d} \quad (3.23)$$

Burada ITS, dolaylı çekme dayanımı kPa cinsinden ifade ederken, $P_{\max}$, numuneyi kırmak için gereken nihai uygulanan yükü kN cinsinden ifade eder. t , numunenin kalınlığı mm cinsinden, d ise numunenin çapı mm cinsinden ifade edilir.



Şekil 3.13. Dolaylı Çekme Mukavemeti numunesi

3.2.4.4. Su hasarı (Nem hassasiyeti) deneyi

Nem hassasiyeti, plastik kaplamaların içindeki nem hareketine karşı dayanıklılığını ve suya temas sonrası oluşabilecek hasarı ifade eder. Su veya nemin kaplama içinde

bulunması, bitüm ile agrega arasındaki bağlantıyı zayıflatır ve bu da kaplamanın bozulmasına yol açar. Sıcak karışım kaplamaların nem hassasiyeti, AASHTO T283 standardına göre belirlenir. Bu standarda göre, sıcak karışım numuneleri iki gruba ayrılır: "şartlandırılmamış" ve "şartlandırılmış." Şartlandırılmamış numuneler, 25°C'deki su banyosunda 2 saat boyunca bekletilir. Şartlandırılmış numuneler ise vakum işlemine tabi tutulur (Şekil 3.14a), bu sayede numunelerin hava boşluklarının %60-80'i su ile dolar. Ardından, numuneler streç filmle sarılarak (Şekil 3.14b) - 18°C'de 16 saat süreyle dondurulur ve sonrasında bu örnekler 60°C su banyosunda 24 saat bekletilir. Süre sonunda numuneler, 25°C'deki su banyosunda 2 saat bekletilir. Bu işlemlerden sonra, şartlandırılmamış (ITSdry) ve şartlandırılmış (ITSwet) numuneler Marshall cihazı ile Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) testine (Şekil 3.14c) tabi tutulur. Test sonuçları, karışım numunelerinin Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı (TSR) değerleri Denklem (3.24) ile hesaplanır. BSK numunelerinin su nedeniyle meydana gelen nem hasarına karşı dayanıklılığı açısından TSR değerlerinin %80'in üzerinde olması beklenmektedir (Geçkil, 2021).

$$\text{Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı} = \frac{IT_{islak}}{IT_{kuru}} \quad (3.24)$$

Burada; IT_{islak} , ıslatılmış örneklerin dolaylı çekme dayanımı kPa olarak ifade edilirken, IT_{kuru} , kuru örneklerin dolaylı çekme dayanımı kPa olarak ifade edilir.



Şekil 3.14. Vakum uygulaması (a), streç film ile kaplama (b) ve ITS deneyi (c)

3.2.4.5. Schellenberg bitüm süzülme deneyi (TS EN 12697-18)

Normal bitümlü karışımlar için $135\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de ve modifiye bitümlü karışımlar (PMB) için $145\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de hazırlanan 1.000 g TMA karışımı, 1.000 ml'lik ve daha önce 110°C 'de ısıtılmış cam behere yerleştirilir ve 0,1 g hassasiyetle tartılır. Beher, üzeri kapatıldıktan sonra 1 saat $\pm$ 1 dakika süreyle normal bitümlü karışımlar için 175°C , modifiye bitümlü karışımlar için ise 185°C sıcaklıktaki etüvde bekletilir. Bu süre sonunda, etüvden çıkarılan beher sarsılmadan boşaltılır. Boşaltılan karışım, 0,1 g hassasiyetinde tekrar tartılır ve ağırlık kaybı yüzde olarak hesaplanır. Deney, üç paralel karışım numunesiyle yapılır ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilir (KTŞ, 2013) (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Schellenberg deneyi

3.2.4.6. Kum yama deneyi

TMA karışımlarında yüzey dokusunun pürüzlülüğü, Kum Yama testi ile doku derinliği ölçülerek belirlenmektedir. Bu araştırmada, Kum Yama testi ASTM E 965 deney standardına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Kum yama testi için öncelikle her bir TMA briketinin ortalama çapı, elektronik kumpas kullanılarak ölçülüp kaydedildi. Ardından, 100 g ağırlığında kum (özellik ağırlığı 1.476 g/cm^3) alınarak, tepsi üzerine yerleştirilen TMA briketinin üzerine döküldü. Dökülen kum, bir düzeç yardımıyla briketin yüzey boşluklarını dolduracak şekilde yaydırıldı. Briketin yüzeyindeki boşlukları dolduran kumun ağırlığı kaydedildi ve her bir numune için dökülen kumun hacmi hesaplandı. Ortaya çıkan ortalama doku

derinliği, aşağıdaki Denklem (3.25) ile hesaplanarak ayrı ayrı belirlendi. Bu tezde kullanılan TMA Tip-1A aşınma tabakasının ortalama doku derinliğinin 1.0 mm'den fazla olması gerektiği belirtilmektedir (KTş, 2013). şekil 3.16'da Kum yama deneyine ait görüntüler yer almaktadır.

$$H = 4V / \pi D^2 \quad (3.25)$$

H: Ortalama doku derinliği,

V: Kumun hacmi,

D: Ortalama kumun çapıdır.



şekil 3.16. Kum yama deneyi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada Isparta Belediyesinden temin edilen (0-5 mm), (5-10 mm), (10-19 mm), bazalt agrega, Göltaş Taşocağından elde edilen kalker filler, 50/70 penetrasyon sınıfında bitümün Elvaloy RET ve Polifosforik asit (PPA) ile modifiye edilmesi sonucu elde edilen bağlayıcı, Fibrocel isimli ticari selülozik fiber ve atık kağıt bardak (AKB) kullanılmıştır.

4.1. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Elvaloy RET Özellikleri

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonu için katkı malzemesi olarak Dupont firmasından temin edilen Reaktif Elastomerik Terpolimer (RET) Elvaloy RET kullanılmıştır. Modifiye karışımda bitüme eklenen Elvaloy RET polimer katkı malzemesinin genel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Elvaloy RET, asfalt bağlayıcının özelliklerini iyileştirmek amacıyla yol kaplamalarında/asfalt karışımlarında kullanılan bir katkıdır. ELVALOY™ 5160 kopolimeri, yüksek sıcaklıklarda SHRP özellikleri sunarak ve düşük sıcaklıklarda esneklik sağlayarak asfalt bağlayıcılarıyla bütünleşir. Karışımda işlem sonrası ELVALOY™ polimeri reaksiyona girer ve çözünmez ya da ayrılmaz. Bağlayıcı, saklama süresine bağlı olarak üst, orta ve alt kısımlarda benzer özellikler gösterir (Anonim, 2025).

Çizelge 4.1. Elvaloy Ret polimerinin genel özellikleri (Anonim, 2025)

Fiziksel Özellikler		
Özellik	Nominal Değerler	Test Yöntemi(leri)
Yoğunluk (ρ)	0,95 g/cm ³	ASTM D792 / ISO 1183
Erime Akış İndeksi (190°C/2.16 kg)	12 g/10 dk	ASTM D1238 / ISO 1133
Termal Özellikler		
Özellik	Nominal Değerler	Test Yöntemi(leri)
Erime Noktası (DSC)	80°C (176°F)	ASTM D3418 / ISO 3146
Donma Noktası (DSC)	55°C (131°F)	ASTM D3418 / ISO 3146
İşleme Bilgileri		
Özellik	Değer	
Maksimum İşleme Sıcaklığı	220°C (428°F)	

Üretici firma Dupont, bitüme %0 ile %2 arasında Elvaloy RET polimer katkı ilavesini tavsiye etmektedir. Ancak bu oran, kullanılan bağlayıcı bitüm türüne ve yapılan deneysel çalışmalara göre değişiklik gösterebilir. İlk olarak, saf bitüme %1.6, %1.7, %1.8, %1.9 ve %2.0 oranlarında Elvaloy RET eklenerek modifiye bitüm hazırlanmıştır. Ancak, kimyasal olarak bitümle reaksiyona giren reaktif polimer katkı Elvaloy RET, %1.9 ve %2.0 oranlarında bağlayıcı bitümle homojen bir şekilde dağılmamış ve tek fazlı bir karışım oluşturmamıştır; bunun sonucunda karışımın yüzeyinde topaklanmalar meydana gelmiştir. Bu sebeple, deneysel çalışmalarda en düşük katkı oranı olan %1.6 kullanılarak modifiye karışım hazırlanmıştır.

Modifiye bitüm hazırlama prosedürü, saf bitüme %1.6 oranında Elvaloy Ret polimer katkısı eklenerek şu adımlarla gerçekleştirilmiştir:

- Saf bitüm (B 50/70), yaklaşık 40 dakika boyunca etüvde 165-175 °C sıcaklık aralığında ısıtılarak sıvı hale getirilir.
- Isıtılan saf bitümden 400-500 gr alınır, karıştırıcıya yerleştirilir ve karıştırma sıcaklığı olan 185°C'ye ulaşana kadar bekletilir.
- Belirlenen %1.6 oranında Elvaloy Ret polimer katkısı tartılır ve hazırlanır.
- Hazırlanan Elvaloy Ret, saf bitüme 4-5 aşamada, her aşama arasında 2'şer dakika ara verilerek eklenir ve karıştırma işlemi yapılır.

Karıştırma işlemi 500 devir/dakika hızında gerçekleştirilir ve toplamda 2 saat sürer.

- Karışıma %0.2-%0.3 oranında süper fosforik asit katalizör olarak ilave edilir ve 30 dakika boyunca karıştırma işlemi devam eder.
- Karışım homojen hale geldiğinde, deney başarılı kabul edilir ve 2 litrelik kaba aktarılır. Kapağı sıkıca kapatıldıktan sonra etüve konularak kür işlemine alınır.
- Kür işlemi, 185°C sıcaklıktaki etüvde 90 dakika boyunca gerçekleştirilir. Bu işlem sonunda, elde edilen bitümlü bağlayıcı diğer deneylerde kullanılmak üzere hazır olur.

Karıştırma işlemi sırasında kullanılan karıştırıcı mikseri ve dört bıçaklı karıştırıcı aparatı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Modifiye bitüm mikseri

4.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Polifosforik Asidin (PPA) Özellikleri

Çalışmada kullanılan PPA'ya ait özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan PPA'nın özellikleri (Anonim, 2025)

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	$H_{n+2}P_nO_{3n+1}$
Fiziksel Form	Sıvı
Konsantrasyon	$\% \geq 90 - \leq 100$
Metal Korozyon Oranı	Metalleri aşındırabilir

4.3. Taş Mastik Asfaltta Kullanılan Selülozik Fiberin (SF) Özellikleri

Çalışmada kullanılan Fibrocell ticari isimli selülozik fibere ait özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan selülozik fibere ait özellikler (Anonim, 2025)

Teknik Özellikler	Değerler
Görünüm	Kalınlık 4-7 mm
Schellenberger Süzülme Değeri (%0,3 ile)	% 0,18 max. (Şartname Kriteri % 0,3)
Nem	Max. % 5
Yağ Absorpsiyonu	Selüloz Ağırlığının En Az 5 Katı

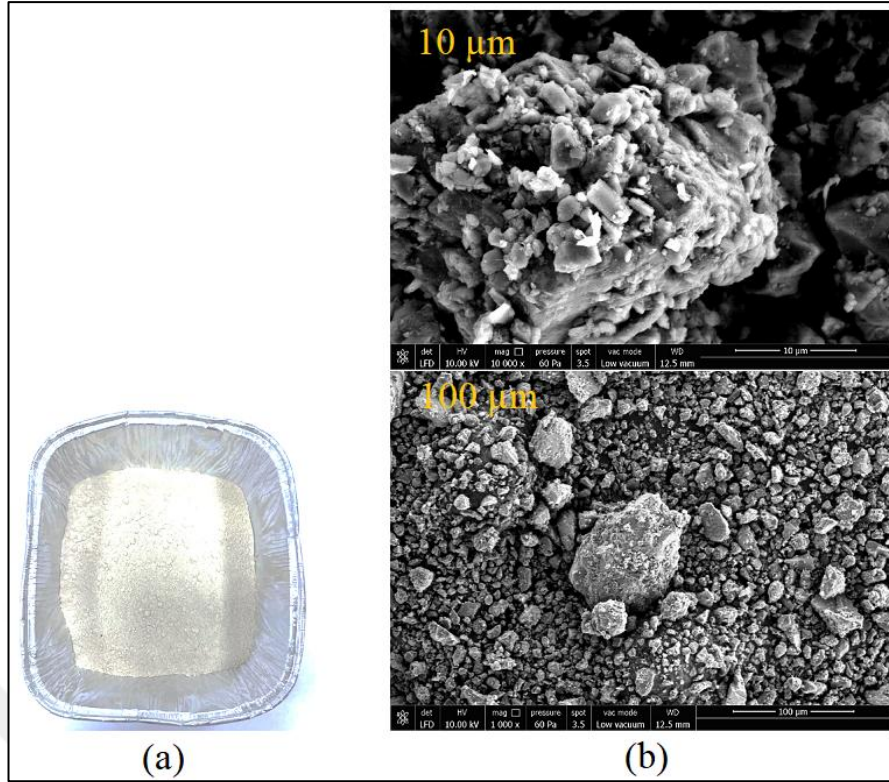
4.4. Taş Mastik Asfaltta Kullanılan Atık Kağıt Bardak Özellikleri

Çalışmada, atık kağıt bardaklar hammadde olarak kullanılmıştır. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğrenci kantininden toplanan atık kağıt bardaklar, temizlenmek amacıyla çeşme suyu ile yıkanmıştır. Ardından, oda sıcaklığında 2 gün süreyle kurutulmuş olan kağıt bardaklar, atık parçalama makinesinde 3-5 mm boyutlarında küçük parçalara ayrılmıştır. Son olarak, parçalanan atık kağıt bardaklar nemlerini kaybetmeleri için 24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta kurutulmuştur (Günaydın, 2024). Ayrıca, bardakların kalınlıkları dijital mikrometre ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda bardak kalınlıkları şu şekilde belirlenmiştir: EPS: 1880 $\mu\text{m} \pm 0.005$; PP, PET ve PE bardaklar: 350 $\mu\text{m} \pm 0.01$; PE film: 200 $\mu\text{m} \pm 0.01$; PS: 850 $\mu\text{m} \pm 0.01$ (Akbulut, 2024).

4.5. Agrega Deney Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan agregalar, (0-5 mm), (5-10 mm) ve (10-19 mm) arasında değişen dane boyutlarına sahip bazalt agregalar ile kireçtaşı mineral filler (taş tozu) olmuştur. Seçilen agregalar, TMA Tip-1 için KGM şartnamesinde belirtilen elek serisine uygun olarak elek analizi testine tabi tutulmuştur.

Kireçtaşı filler (LS) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 4.2'de yer almaktadır. Kireçtaşı örneklerinin taneli bir yapıya sahip olduğu ve bu tanelerin köşeli olduğu gözlemlenmiştir. Bitümlü karışımlarda agregaların köşeli yapısının, karışımdaki agregaların birbirine daha sağlam şekilde kenetlenmesini sağladığı bilinmektedir.



Şekil 4.2. (a) Kireçtaşı ve (b) kireçtaşına ait SEM görüntüsü (Morova, 2024)

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler KTŞ (2013) belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Agregalara ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. İri ve İnce agregaya ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları

Deney	Sonuç	Standart
İri agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.595	TS EN 1097-6
İri agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.586	TS EN 1097-6
İri agregaya su absorpsiyonu	%0.4	TS EN 1097-6
İnce agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.567	TS EN 1097-6
İnce agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.535	TS EN 1097-6
İnce agregaya su absorpsiyonu	%0.6	TS EN 1097-6

Çizelge 4.5. Kullanılan filler malzemesinin özgül ağırlık değeri

Filler Cinsi	Özgül Ağırlık Değeri (gr/cm^3)	Standart
Kırmataş filler (Taş tozu)	2.690	ASTM C 854-TS EN 1097

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri, KTŞ (2013) tarafından belirlenen standartlara uygun şekilde tespit edilmiştir. Bu agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerine dair deneysel sonuçlar, sırasıyla Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

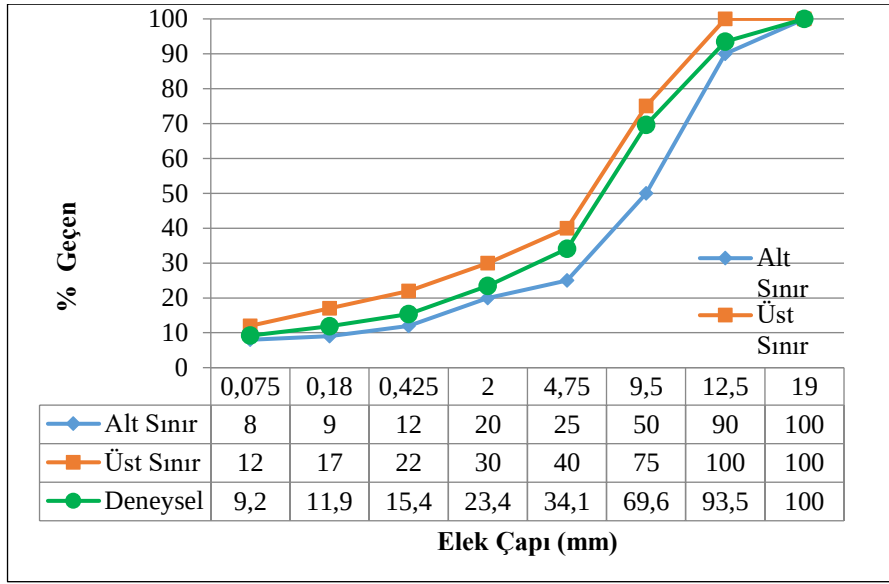
Çizelge 4.6. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Agrega Deneyleri				Sonuç	Standart	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Deneyle)				2.589	ASTM D-2041	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Hesapla)				2.589	-	
Agrega Deneyleri				Sonuç	KTŞ Değerleri (TMA Aşınma Tabakası)	Standart
Parçalanma Direnci (Los Angeles Aşınma Kaybı), (% Kayıp)				20	≤ 25	AASHTO T-96
Aşınma Direnci (Mikro-Deval)				9.1		TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık ($MgSO_4$, Donma Kaybı), (%)				1.6	≤ 14	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, (%)				17	≤ 25	BS 812
Soyulma Mukavemeti, (%)				70-75	≥ 60	TS EN12697-11
Metilen mavisi, (g/kg) (Karışımın)				1.5	≤ 1.5	TS EN 933-9

Elek analizi testi, KTŞ (2013) aşınma tabakası için belirlenen standartlara uygun olarak yapılmıştır. Analiz sonuçları doğrultusunda elde edilen agreganın gradasyonu, Çizelge 4.7'de ve gradasyon eğrisi ise Şekil 4.3'te sunulmuştur. Yapılan deneysel veriler, KTŞ tarafından belirlenen sınır değerler içinde yer almaktadır.

Çizelge 4.7. Deneylerde kullanılan agrega granülometrisi

KULLANIM ORANLARI		10	66	15	9	100	K.T.Ş TMA Tip-1 A			
ELEK AÇIKLIĞI		(13-19) mm.	(5-13) mm.	(0-5) mm.	Fiiller	KARIŞIM GRAD.	Kısım 408 Limitleri			
mm	inch	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen		Şartname		Tolerans	
19.1	3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100	100
12.7	1/2"	35.1	100.0	100.0	100.0	93.5	90	100	90	97.5
9.52	3/8"	5.4	68.3	100.0	100.0	69.6	50	75	65.6	73.6
4.76	No.4	0.5	15.3	100.0	100.0	34.1	25	40	31.1	37.1
2.00	No.10	0.1	4.5	75.9	100.0	23.4	20	30	20.4	26.4
0.42	No.40	0.1	1.6	35.6	100.0	15.4	12	22	12.4	18.4
0.177	No.80	0.1	0.1	22.7	93.8	11.9	9	17	9	14.9
0.075	No.200	0.1	0.1	12.4	81.0	9.2	8	12	8	11.2



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan TMA Tip-1A aşınma tabakası karışım gradasyonu

TMA karışımını hazırlamak için, karışım gradasyonlarının her birinin elek üzerindeki kalan yüzdeleri hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere, TMA Tip-1A karışım gradasyonu için 1050 gr'lık agrega numunesi alınmış ve her bir elekte kalan ağırlıklar ile kümülatif ağırlıklar belirlenerek Çizelge 4.8'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8. 1050 gramlık karışımın elek üzerindeki ağırlıkları

Elek açıklığı		TMA Tip-1A Karışım Gradasyonu		1050 gr'lık numune	
inç	mm	% Geçen	% Kalan	Kalan ağırlık (gr)	Kümülatif ağırlık (gr)
3/4"	19.0	100.0	-	-	-
1/2"	12.5	93.5	6.5	68.25	68.25
3/8"	9.5	69.9	23.6	247.8	316.05
No.4	4.75	34.1	35.8	375.9	691.95
No.10	2.00	23.4	10.7	112.35	804.30
No.40	0.425	15.4	8	84	888.30
No.80	0.180	11.9	3.5	36.75	925.05
No.200	0.075	9.2	2.7	28.35	953.40
Elek altı		-	9.2	96.6	1050

TMA Tip-1A karışım gradasyonunda; No.4 eleği üzerindeki malzeme kaba agrega (%K), No.4 eleğinden geçen malzeme ince agrega (%İ), elek altındaki malzeme ise filler (%F) grubunu oluşturmaktadır. Çizelge 4.8'den elde edilen verilere göre, %K, %İ ve %F malzeme yüzdeleri sırasıyla 65.9, 24.9 ve 9.2 olarak belirlenmiştir.

4.6. Bitüm Deney Sonuçları

Çalışmada kullanılan bitüm, Aliğa rafinerisinde üretilmiş olup, sıcak karışım asfalt beton numunelerinin üretiminde ise Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesi'nden temin edilmiştir. Kullanılan bitüm, B 50-70 penetrasyon sınıfına sahip olup, özgül ağırlığı 1.037 gr/cm³'dür. Saf ve modifiye bitümün özellikleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, kullanılan bitümün KTŞ standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün özellikleri

Bitümün Özellikleri		
Test Adı	Ortalama değerler	Standart (KTŞ,2013)
Kaynak	Aliğa/Türkiye	-
Penetrasyon Derecesi	50-70	-
Penetrasyon (25°C)	59	ASTM D5
Parlama Noktası (°C)	290°C	ASTM D92
Yumuşama Noktası (°C)	51°C	ASTM D36
Isıtma Kaybı (%)	2.0	ASTM D6
Süneklik (25°C'de 5 cm/dakika)	>100 cm	ASTM D113
25°C'de Özgül Ağırlık	1.033	ASTM D70

Çizelge 4.10. Elvaloy ve PPA katkılı PMB bitümün özellikleri

Sıra No	DENEY ADI	STANDARDI / DENEY METODU	BİRİM	SONUÇLAR (1,6%)	PMB 70-16 Şartnamesi
1	PENETRASYON (25°C, 100g, 5sn.)**	TS EN 1426	0,1mm	45	40-100
2	YUMUŞAMA NOKTASI**	TS EN 1427	°C	60	≥60
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE	TS EN 13589	J	-	≥0,5
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C)**	TS EN 13398	%	75	≥60
5	PARLAMA NOKTASI	TS EN ISO 2592	°C	-	≥220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK**	TS EN 15326	g/cm ³	-	1.0-1.1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ	TS EN 13399	-	-	-
7.1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	TS EN 1427	°C	2	≤5
7.2	PENETRASYON FARKI	TS EN 1426	0,1mm	2	≤13
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (G*/sinδ >1kPa)	TS EN 14770	°C	82,9	≥70
9	DÖNMELLİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ	TS EN 12607-1	-	-	-
9.1	KÜTLE KAYBI / DEĞİŞİMİ	TS EN 12607-1	%	0,03	≤1,0
9.2	YUMUŞAMA NOKTASI	TS EN 1427	°C	63	≥60
9.3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik (artma)	TS EN 1427	°C	3	≤8
9.4	KALICI PENETRASYON	TS EN 1426	%	64	≥50
9.5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (G*/sinδ >2,2kPa)	TS EN 14770 / AASHTO T315	°C	84,6	≥70
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Deneyler	TS EN 14769 / AASHTO R28	-	-	-
10.1	DSR (G*/sinδ <5000kPa)	TS EN 14770 / AASHTO T315	°C	25,5	≤31
10.2	BBR (S≤300MPa, m≥0,300)	TS EN 14771 / AASHTO T313	°C	-6	≤-6

4.7. TMA Karışımlara Ait Deney Sonuçları

Bu kısımda Marshall metodu ile TMA dizayn sonuçları verilmiştir. Sonrasında ise belirlenen optimum bitüm içeriklerine göre hazırlanan TMA numuneler üzerinde uygulanan ITS, TSR, bitüm süzülme ve yüzey doku derinlikleri deney sonuçları verilmiştir.

4.7.1. Marshall metodu ile TMA karışım dizayn sonuçları

Çalışmada Elvaloy RET (%1.6) katkısı ve Polifosforik asit (PPA, %0.2) ile modifiye edilmiş PG 70-16 cinsi Polimer Modifiye Bitüm (PMB) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında belirlenen gradasyon sabit tutularak %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 PMB oranlarında ve %0.35 selülozik fiber (SF) katkısı ile 15 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı (OBO) belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada TMA karışımında selülozik fiber yerine farklı oranlarda (%0.15 %0.25, %0.35, %0.45) AKB ve fiber içermeyen (%0 NF) TMA numuneler hazırlanmıştır. Her bir AKB oranı için %5.0 %5.5 %6.0 %6.5 %7.0 bitüm içeriklerinde TMA numuneler hazırlanmış ve her bir seri için Marshall stabilite ve akma deneyi (MS) ile optimum bitüm oranları (OBO) belirlenmiştir.

Fiber içermeyen %0 NF, %0.35 SF ve %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 AKB ile hazırlanmış TMA karışımları ile ilgili Marshall deney sonuçları sırasıyla Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16’da detaylı olarak verilmiştir. Her bir TMA Marshall numunesinin; havadaki ağırlığı, sudaki ağırlığı, doymun yüzey ağırlıkları, hacim özgül ağırlıkları (Dp), Maksimum teorik özgül ağırlıkları (Dt), hava boşluk oranı (Vh), agregalar arası boşluk oranı (VMA), asfalt dolu boşluk oranı (VFA), akma ve stabilite sonuçları bu tablolarda özetlenmektedir. Marshall deneyinin hesap detayında kullanılan sonuçlar aşağıdaki (Denklem 4.1-Denklem 4.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$G_{sa} = \left(\frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%I}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \right) = \left(\frac{65.9 + 24.9 + 9.2}{\frac{65.9}{2.595} + \frac{24.9}{2.567} + \frac{9.2}{2.69}} \right) = 2.596 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.1)$$

$$G_{sb} = \left(\frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%I}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \right) = \left(\frac{65.9 + 24.9 + 9.2}{\frac{65.9}{2.586} + \frac{24.9}{2.535} + \frac{9.2}{2.69}} \right) = 2.582 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.2)$$

$$G_{ef} = \left(\frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} - \frac{W_a}{G_b}} \right) = \left(\frac{100}{\frac{100 + 6}{2.385} - \frac{6}{1.032}} \right) = 2.589 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.3)$$

$$P_{ba} = \left(100x \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{ef}} \right) \times G_b = P_{ba} = \left(100x \frac{2.589 - 2.582}{2.582 \times 2.589} \right) \times 1.032 = 0.11 \quad (4.4)$$

Marshall deney sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, %0.25 AKB katkılı numunelerin %6 bitüm oranında hesaplanmış maksimum teorik özgül ağırlık (D_t), hava boşluğu (V_h), agregalar arası boşluk (VMA) ve asfalt dolu boşluk (V_{FA}) değerlerinin hesaplanması, sırasıyla aşağıdaki (Denklem 4.5-Denklem 4.8) kullanılarak yapılmıştır.

$$D_t = \left(\frac{100 + W_a}{\left(\frac{100}{G_{ef}} \right) - \left(\frac{W_a}{G_b} \right)} \right) = \left(\frac{100 + 6}{\left(\frac{100}{2.589} \right) - \left(\frac{6}{1.032} \right)} \right) = 2.385 \text{ Gr/cm}^3 \quad (4.5)$$

$$V_h = \left(\frac{D_t - D_p}{D_t} \right) \times 100 = \left(\frac{2.385 - 2.297}{2.385} \right) \times 100 = 3.689 (\%) \quad (4.6)$$

$$VMA = \left(100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \right) = \left(100 - \frac{2.297}{2.582} \times \frac{100}{100 + 6} \times 100 \right) = 16.07 (\%) \quad (4.7)$$

$$VFA = \left(\frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \right) = \left(\frac{16.07 - 3.689}{16.07} \times 100 \right) = 77.04 (\%) \quad (4.8)$$

Çizelge 4.11. %0 NF numunelere ait Marshall sonuçları

Briket No	Bitüm			Elyaf gr	Briket Yükseklik (mm)				Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Gırlık (gr)	Hacim V (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık (Dp)	Maks. Teo. Öz. Ag. (DT)	Boşluk % Vh	VMA (%)	Asf. Dolu Boşluk % Vf	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltil. Faktörü	Düzeltil. Stabilite
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)		1	2	3	Ort.													
1	5.00	4.76	52.50	0.000	64.2	64.26	63.4	63.97	1091.0	629.0	1100.5	471.5	2.314	2.415	3.89	14.37	72.9	6.25	1001.0	0.990	991
2	5.00	4.76	52.50		63.1	63.14	63.5	63.25	1099.4	637.0	1110	473	2.324					3.12	936.0	1.008	943
3	5.00	4.76	52.50		62.2	62.42	62.5	62.39	1099.1	638.0	1110.5	472.5	2.326					4.02	1055.0	1.028	1085
ORT.													2.321					4.46			1006
4	5.50	5.21	57.75	0.000	60.9	61.41	61.7	61.34	1099.1	636.5	1112.5	476	2.309	2.400	3.14	14.66	78.6	3.11	1010.0	1.059	1070
5	5.50	5.21	57.75		63.1	63.96	63.3	63.46	1104.9	637.5	1111.5	474	2.331					7.50	1006.0	1.000	1006
6	5.50	5.21	57.75		63.1	63.38	62.3	62.93	1098.3	634.0	1104.5	470.5	2.334					4.00	1025.0	1.016	1041
ORT.													2.325					4.64			1039
7	6.00	5.66	63.00	0.000	63.4	62.4	62.9	62.90	1106.5	639.0	1112.5	473.5	2.337	2.385	2.46	14.99	83.6	6.97	987.0	1.016	1003
8	6.00	5.66	63.00		63.4	62.7	62.8	62.97	1109.5	639.5	1116	476.5	2.328					3.66	997.0	1.013	1010
9	6.00	5.66	63.00		64.1	64	64.7	64.27	1111.0	641.0	1121	480	2.315					3.50	992.0	0.980	972
ORT.													2.327					4.66			995
10	6.50	6.10	68.25	0.000	64	63.5	64.2	63.90	1109.0	639.0	1115.5	476.5	2.327	2.371	1.73	15.28	88.7	6.25	938.7	0.990	929
11	6.50	6.10	68.25		62.2	62.8	62.5	62.50	1110.0	639.0	1115	476	2.332					4.20	995.0	1.026	1021
12	6.50	6.10	68.25					63.15	1109.5	639.0	1115.25	476.25	2.330					3.95	1020.0	1.008	1028
ORT.													2.330					4.69			993
13	7.00	6.54	73.50	0.000	62.3	62.9	62.4	62.53	1113.0	636.5	1116	479.5	2.321	2.356	1.30	15.82	91.8	5.75	984.6	1.026	1010
14	7.00	6.54	73.50		62.4	63	62.3	62.57	1115.0	637.0	1115.5	478.5	2.330					4.36	901.0	1.023	922
15	7.00	6.54	73.50					62.52	1114.0	636.8	1115.75	479	2.326					4.56	970.0	1.026	995
ORT.													2.326					4.72			976

Çizelge 4.12. %0.35 SF numunelere ait Marshall sonuçları

Briket No	Bitüm			Elyaf	Briket Yüksekli (mm)				Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Öz.	Maks. Teo.	Boşluk	VMA	Asf. Dolu
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)	gr	1	2	3	Ort.	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	K. Çırhk (gr)	V (cm3)	Ağırlık (Dp)	Öz. Ag. (DT)	% Vh	(%)	Boşluk % Vf
1	5	4.8	52.5	3.86	64.2	64	64	64.07	1094.2	632.2	1114.5	482.3	2.269	2.474	7.82	17.38	55.0
2	5	4.8	52.5		64.1	63.9	64.1	64.03	1096.4	631.4	1112.1	480.7	2.281				
3	5	4.8	52.5		64	63.8	63.9	63.90	1095.8	632.5	1110.5	478	2.292				
ORT.													2.281				
4	5.5	5.2	57.8	3.88	63.8	63.7	63.5	63.67	1098.4	634.4	1105.4	471	2.332	2.458	5.32	16.10	66.9
5	5.5	5.2	57.8		63.8	63.5	63.6	63.63	1096.4	633.9	1103.6	469.7	2.334				
6	5.5	5.2	57.8		63.5	63.4	63.5	63.47	1097.9	630.1	1104.4	474.3	2.315				
ORT.													2.327				
7	6	5.7	63.0	3.90	63.3	63.3	63.2	63.27	1102.8	636.5	1106.2	469.7	2.348	2.442	4.24	16.09	73.7
8	6	5.7	63.0		63.2	63.2	63.1	63.17	1098.6	635.0	1105.7	470.7	2.334				
9	6	5.7	63.0		63	63	63	63.00	1112.9	640.0	1116.9	476.9	2.334				
ORT.													2.338				
10	6.5	6.1	68.3	3.91	62.4	62.5	62.5	62.47	1097.6	633.2	1100.1	466.9	2.351	2.426	3.29	16.19	79.7
11	6.5	6.1	68.3		62.3	62.1	62.1	62.17	1103.1	634.2	1105	470.8	2.343				
12	6.5	6.1	68.3		62.2	62.4	62.4	62.33	1105.8	637.1	1108.5	471.4	2.346				
ORT.													2.347				
13	7	6.5	73.5	3.93	61.4	61.3	61.3	61.33	1119.5	644.2	1122.1	477.9	2.343	2.411	2.76	16.65	83.4
14	7	6.5	73.5		61.6	61.4	61.4	61.47	1121.1	645.6	1122.6	477	2.350				
15	7	6.5	73.5		61.6	61.5	61.5	61.53	1120.6	643.2	1121.9	478.7	2.341				
ORT.													2.345				

Çizelge 4.13. %0.15 AKB numunelere ait Marshall sonuçları

Briket No	Bitüm			Elyaf	Briket Yüksekli (mm)				Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Öz.	Maks. Teo.	Boşluk	VMA	Asf. Dolu	Akma	Stabilite	Düzel.	Düzel.
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)	gr	1	2	3	Ort.	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	K. Gırlık (gr)	V (cm3)	Ağırlık (Dp)	Öz. Ag. (DT)	% Vh	(%)	Boşluk % Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	Stabilite
1	5	4.8	52.5	1.65	64	64.5	64.1	64.20	1106.0	641.0	1121.5	480.5	2.302	2.415	4.59	15.00	69.4	7.13	879	0.982	863
2	5	4.8	52.5		63.9	64.7	64	64.20	1097.0	637.5	1109	471.5	2.327					3.56	987	0.990	977
3	5	4.8	52.5		63.9	63.8	63.8	63.83	1106.0	638.0	1122	484	2.285					3.25	950	0.992	942
ORT.													2.305					4.65			928
4	5.5	5.2	57.8	1.66	65.9	65.6	65.4	65.63	1111.0	644.0	1125	481	2.310	2.400	3.71	15.16	75.5	4.58	995	0.949	945
5	5.5	5.2	57.8		66.3	65.8	66.2	66.10	1114.0	643.5	1125	481.5	2.314					5.25	993	0.938	932
6	5.5	5.2	57.8		66.1	65.7	65.8	65.87	1111.0	644.5	1125.5	481	2.310					4.35	985	0.943	929
ORT.													2.311					4.68			935
7	6	5.7	63.0	1.67	63	64	63.2	63.40	1102.5	635.5	1111.5	476	2.316	2.385	2.99	15.45	80.6	5.16	1107	1.003	1110
8	6	5.7	63.0		64.7	65.3	64.7	64.90	1106.0	636.0	1117	481	2.299					5.23	987	0.965	953
9	6	5.7	63.0		63.9	64.65	64	64.15	1105.0	637.0	1112	475	2.326					5.00	1050	0.982	1031
ORT.													2.314					4.80			1031
10	6.5	6.1	68.3	1.68	64.6	64.3	65	64.63	1114.0	639.0	1122	483	2.306	2.371	2.39	15.85	84.9	5.41	979	0.970	950
11	6.5	6.1	68.3		63.6	64	63.5	63.70	1112.0	639.0	1118	479	2.322					4.45	1026	0.995	1021
12	6.5	6.1	68.3		64.1	64.15	64.3	64.17	1113.0	639.0	1120	481	2.314					4.95	985	0.982	967
ORT.													2.314					4.83			979
13	7	6.5	73.5	1.69	64.7	65.4	65.4	65.17	1127.5	644.5	1131.5	487	2.315	2.356	1.86	16.30	88.6	5.41	985	0.957	943
14	7	6.5	73.5		64.1	64.4	64	64.17	1114.5	639.0	1121.5	482.5	2.310					4.83	991	0.957	949
15	7	6.5	73.5		64.4	64.9	64.7	64.67	1121.0	641.8	1126.5	484.75	2.313					4.87	990	0.970	960
ORT.													2.313					4.86			951

Çizelge 4.14. %0.25 AKB numunelere ait Marshall sonuçları

Briket No	Bitüm			Elyaf	Briket Yüksekli (mm)				Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Öz.	Maks. Teo.	Boşluk	VMA	Asf. Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltil.	Düzeltil.
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)	gr	1	2	3	Ort.	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	K. Gırlık (gr)	V (cm ³)	Ağırlık (Dp)	Öz. Ag. (DT)	% Vh	(%)	Boşluk % Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	Stabilite
1	5	4.8	52.5	2.76	66.2	66.4	66.7	66.43	1098.5	631.0	1113.5	482.5	2.277	2.415	5.59	15.89	64.8	4.14	1104	0.930	1027
2	5	4.8	52.5		64.1	64.6	64.9	64.53	1099.0	632.0	1112.5	480.5	2.287					4.23	984	0.975	960
3	5	4.8	52.5		65.2	65.5	65.8	65.48	1098.8	630.5	1113	482.5	2.277					4.10	992	0.930	923
ORT.													2.280					4.16			970
4	5.5	5.2	57.8	2.77	65.7	66	66.3	66.00	1107.0	637.5	1122	484.5	2.285	2.400	4.71	16.03	70.6	3.99	1130	0.940	1062
5	5.5	5.2	57.8		65.3	65.7	65.9	65.63	1104.0	638.0	1120	482	2.290					4.29	991	0.949	941
6	5.5	5.2	57.8		65.5	65.85	66.1	65.82	1105.5	637.5	1121	483.5	2.286					4.27	995	0.945	940
ORT.													2.287					4.18			981
7	6	5.7	63.0	2.78	63.4	63.6	63.9	63.63	1105.0	635.0	1115.5	480.5	2.300	2.385	3.69	16.07	77.0	3.83	1052	0.998	1049
8	6	5.7	63.0		63.9	64.4	63.5	63.93	1109.5	638.0	1121.5	483.5	2.295					5.39	1161	0.990	1149
9	6	5.7	63.0		63.7	64	63.7	63.78	1107.3	636.5	1118.5	482	2.297					3.89	1010	0.992	1002
ORT.													2.297					4.37			1067
10	6.5	6.1	68.3	2.80	64.1	64	63.6	63.90	1116.0	638.5	1123	484.5	2.303	2.371	2.70	16.11	83.3	4.89	996	0.990	986
11	6.5	6.1	68.3		62.6	62.8	63.1	62.83	1114.5	643.0	1123.5	482	2.312					4.65	1035	1.018	1054
12	6.5	6.1	68.3		63.4	63.4	63.4	63.37	1115.5	639.5	1122	484	2.305					3.95	1021	1.003	1024
ORT.													2.307					4.50			1021
13	7	6.5	73.5	2.81	62.7	63.7	63.5	63.30	1107.0	635.0	1113.5	482	2.297	2.356	2.26	16.64	86.4	5.20	986	1.006	991
14	7	6.5	73.5		64.5	64	64.6	64.37	1122.0	643.0	1129.5	486.5	2.306					5.17	997	0.978	975
15	7	6.5	73.5		63.6	63.85	64.1	63.83	1122.0	643.0	1129.5	486.5	2.306					5.23	925	0.992	918
ORT.													2.303					5.20			961

Çizelge 4.15. %0.35 AKB numunelere ait Marshall sonuçları

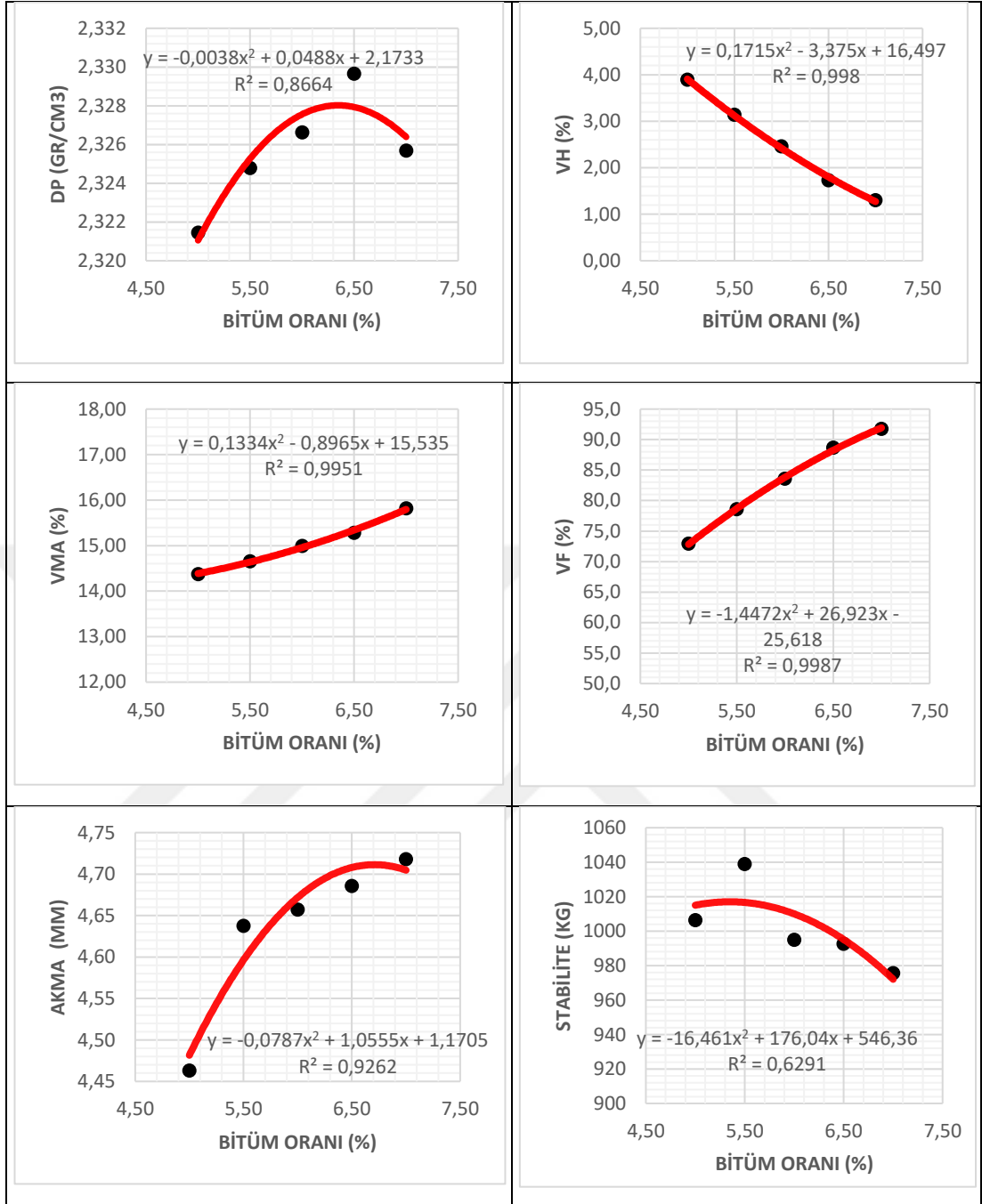
Briket No	Bitüm			Elyaf	Briket Yüksekli (mm)				Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Öz.	Maks. Teo.	Boşluk	VMA	Asf. Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltil.	Düzeltil.
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)	gr	1	2	3	Ort.	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	K. Çırlık (gr)	V (cm3)	Ağırlık (Dp)	Öz. Ag. (DT)	% Vh	(%)	Boşluk % Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	Stabilite
1	5	4.8	52.5	3.86	65.7	66	66.3	66.00	1101.0	627.0	1114	487	2.261	2.415	6.40	16.60	61.5	2.92	999	0.940	939
2	5	4.8	52.5		66.6	65.5	65.7	65.93	1105.0	627.0	1116.5	489.5	2.257					4.55	1126	0.943	1062
3	5	4.8	52.5		65.9	66	66.1	66.00	1104.0	628.0	1115.5	487.5	2.265					2.95	1005	0.943	948
ORT.													2.261					3.47			983
4	5.5	5.2	57.8	3.88	65.1	65.7	65.4	65.40	1112.5	634.0	1124	490	2.270	2.400	5.01	16.30	69.3	4.21	1101	0.953	1049
5	5.5	5.2	57.8		65.3	64.8	65.5	65.20	1100.0	636.0	1117.5	481.5	2.285					3.01	999	0.957	956
6	5.5	5.2	57.8		65.2	65.3	65.4	65.30	1106.0	635.0	1119	484	2.285					3.45	1020	0.955	974
ORT.													2.280					3.56			993
7	6	5.7	63.0	3.90	66	66.5	66.4	66.30	1111.5	638.0	1126	488	2.278	2.385	3.96	16.30	75.7	3.71	1045	0.934	976
8	6	5.7	63.0		65.5	66.3	65.9	65.90	1103.0	641.0	1117	476	2.317					3.51	1070	0.943	1009
9	6	5.7	63.0		65.3	66.1	65.7	65.70	1107.0	637.0	1123	486	2.278					3.65	1065	0.947	1009
ORT.													2.291					3.62			998
10	6.5	6.1	68.3	3.91	64.3	64.5	64.7	64.50	1119.5	641.0	1129.5	488.5	2.292	2.371	3.49	16.80	79.2	3.65	985	0.975	961
11	6.5	6.1	68.3		65.6	65.8	65.9	65.77	1111.5	637.5	1124.5	487	2.282					4.90	988	0.945	934
12	6.5	6.1	68.3		64.7	64.9	65.4	65.00	1114.0	635.5	1122	486.5	2.290					3.69	1025	0.962	986
ORT.													2.288					4.08			960
13	7	6.5	73.5	3.93	64.2	64.1	64.9	64.38	1116.5	636.5	1126	489.5	2.281	2.356	3.01	17.28	82.6	4.52	993	0.978	971
14	7	6.5	73.5		62.8	63.1	62.6	62.83	1123.5	638.5	1127	488.5	2.300					4.21	987	1.018	1004
15	7	6.5	73.5		65.1	64.84	65.8	65.26	1119.5	637.0	1129	492	2.275					4.25	925	0.955	883
ORT.													2.285					4.33			953

Çizelge 4.16. %0.45 AKB numunelere ait Marshall sonuçları

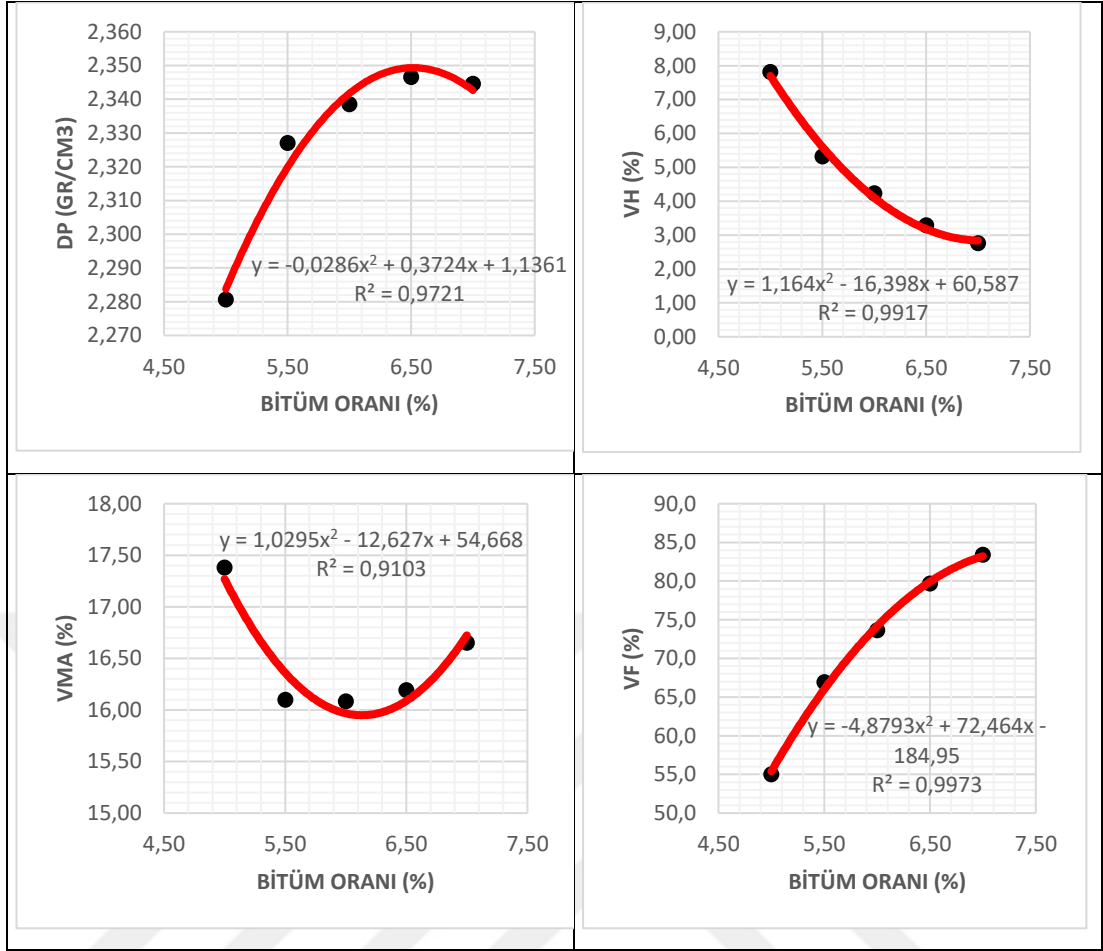
Briket No	Bitüm			Elyaf	Briket Yüksekli (mm)				Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Öz.	Maks. Teo.	Boşluk	VMA	Asf. Dolu	Akma	Stabilite	Düzel.	Düzel.
	Wa (%)	Wb (%)	W (gr)	gr	1	2	3	Ort.	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	K. Çırlık (gr)	V (cm3)	Ağırlık (Dp)	Öz. Ag. (DT)	% Vh	(%)	Boşluk % Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	Stabilite
1	5	4.8	52.5	4.96	66.4	66.2	66.5	66.37	1102.0	620.0	1114.5	494.5	2.229	2.415	7.74	17.80	56.5	boş	935	0.932	871
2	5	4.8	52.5		66.1	66.3	66.4	66.25	1102.0	620.0	1114.5	494.5	2.229					3.36	947	0.934	884
3	5	4.8	52.5		66.3	66.2	66.5	66.33	1102.0	620.0	1114.5	494.5	2.229					3.10	915	0.934	855
ORT.													2.229					3.41	932		870
4	5.5	5.2	57.8	4.98	66.5	65.8	65.9	66.07	1111.0	627.0	1124.5	497.5	2.233	2.400	6.96	18.02	61.4	3.29	985	0.940	926
5	5.5	5.2	57.8		66.4	65.9	65.7	66.00	1111.0	627.0	1124.5	497.5	2.233					3.65	945	0.940	888
6	5.5	5.2	57.8		66.5	65.8	65.9	66.07	1111.0	627.0	1124.5	497.5	2.233					3.98	932	0.940	876
ORT.													2.233					3.64	954		897
7	6	5.7	63.0	5.01	68.4	67.8	67.7	67.97	1115.5	634.5	1132.5	498	2.240	2.385	6.09	18.16	66.4	3.85	1005	0.894	898
8	6	5.7	63.0		68.2	68	67.5	67.90	1115.5	634.5	1132.5	498	2.240					3.95	1004	0.897	901
9	6	5.7	63.0		68.5	67.8	67.7	68.00	1115.5	634.5	1132.5	498	2.240					3.57	1015	0.894	907
ORT.													2.240					3.79	1008		902
10	6.5	6.1	68.3	5.03	65.4	65.9	66.4	65.90	1114.5	633.5	1128.5	495	2.252	2.371	5.03	18.12	72.3	4.23	985	0.943	929
11	6.5	6.1	68.3		65.5	65.7	66.4	65.88	1114.5	633.5	1128.5	495	2.252					4.25	995	0.920	915
12	6.5	6.1	68.3		65.2	65.85	66.5	65.85	1114.5	633.5	1128.5	495	2.252					3.92	1015	0.920	934
ORT.													2.252					4.13	998		926
13	7	6.5	73.5	5.06	65.2	64.6	65.4	65.07	1115.5	636.0	1132.5	496.5	2.247	2.356	4.65	18.68	75.1	4.77	965	0.962	928
14	7	6.5	73.5		65.4	64.7	65.1	65.07	1115.5	636.0	1132.5	496.5	2.247					4.29	945	0.962	909
15	7	6.5	73.5		65.3	64.6	65.4	65.09	1115.5	636.0	1132.5	496.5	2.247					3.89	957	0.962	921
ORT.													2.247					4.32	956		919

Marshall yöntemiyle gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen D_p , V_h , VMA, VFA, Stabilité ve akma sonuçları Fiber içermeyen %0 NF, %0.35 SF ve %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 AKB ile hazırlanmış TMA karışımları için sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.

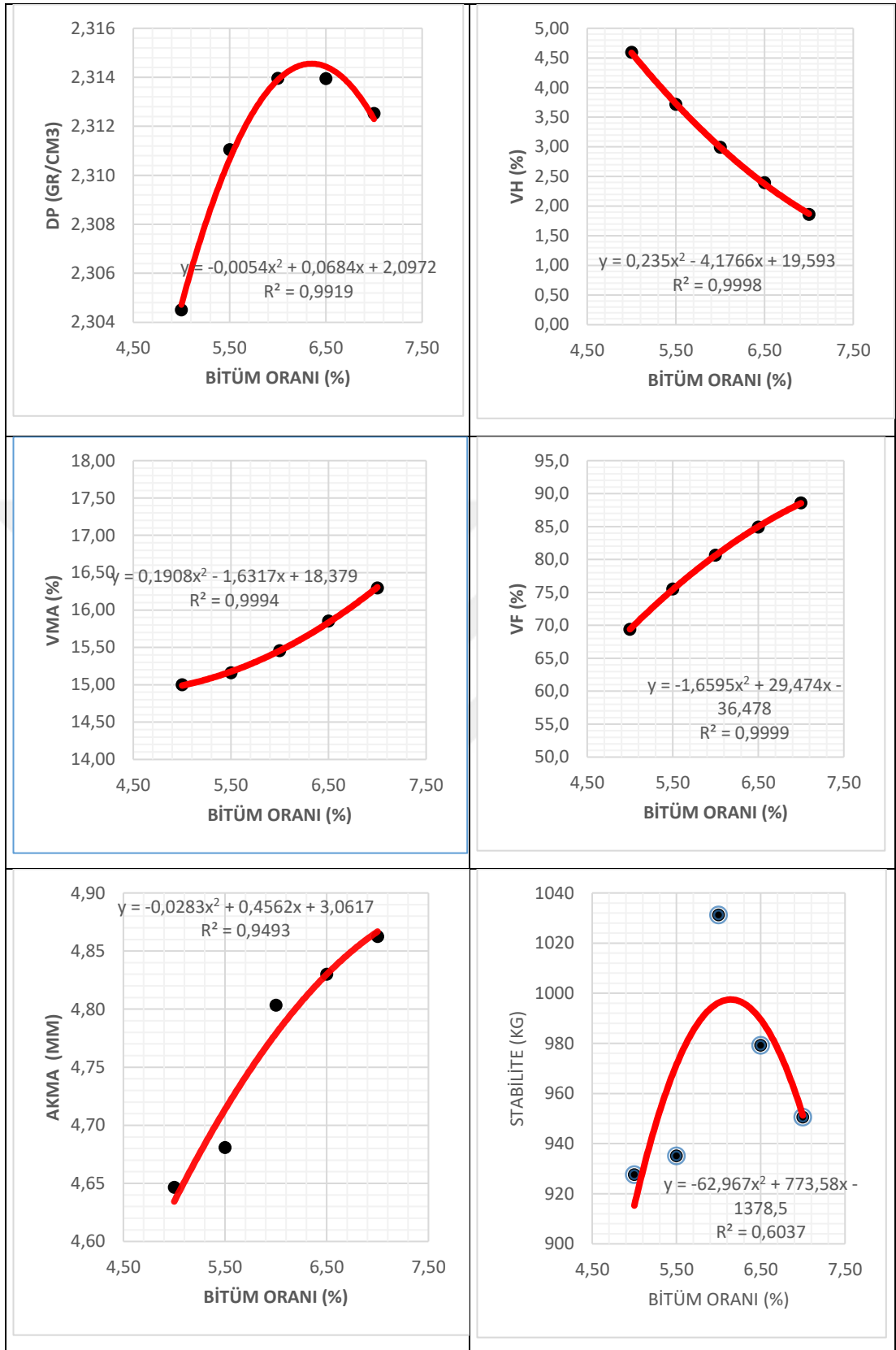
Marshall deneyinden elde edilen; Şekil 6.4’de %0 NF fiber içermeyen karışımı, Şekil 4.5’de %0.35 SF selüloz fiber karışımı, Şekil 4.6’da %0.15AKB atık kağıt bardak karışımı, Şekil 4.7’de %0.25AKB atık kağıt bardak karışımı, Şekil 4.8’de %0.35AKB atık kağıt bardak karışımı, Şekil 6.9’da %0.45AKB atık kağıt bardak karışımının sonuçları grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafiklerdeki hacim özgül ağırlığı (D_p , g/cm^3), maksimum teorik özgül ağırlık (D_t , g/cm^3), hava boşluğu (V_h , %), agregalar arası boşluk (VMA, %), asfalt dolu boşluk (VFA, %), akma (mm), stabilité (kg) sonuçlarını temsil etmektedir.



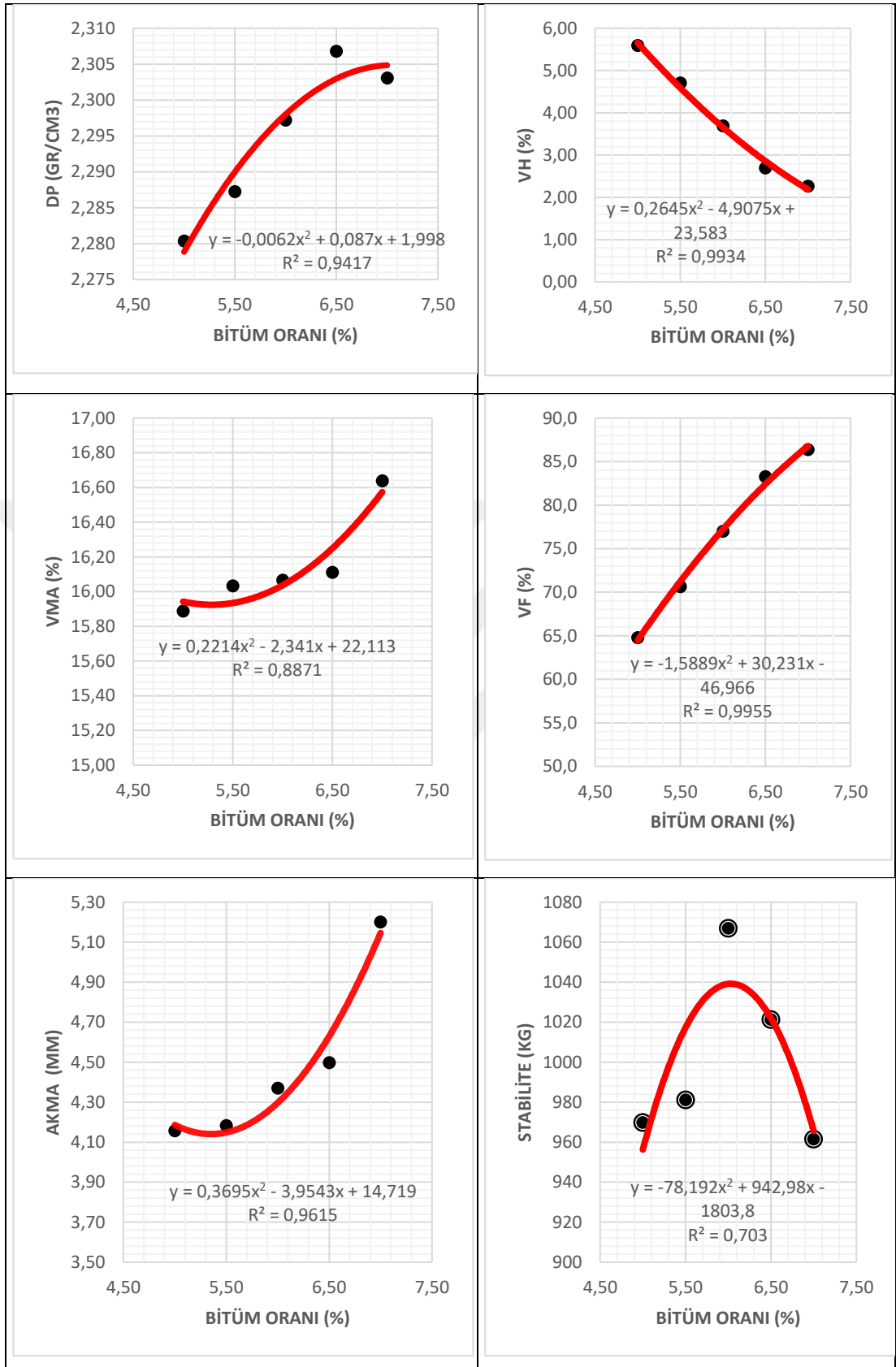
Şekil 4.4. %0 NF fiber içermeyen karışım



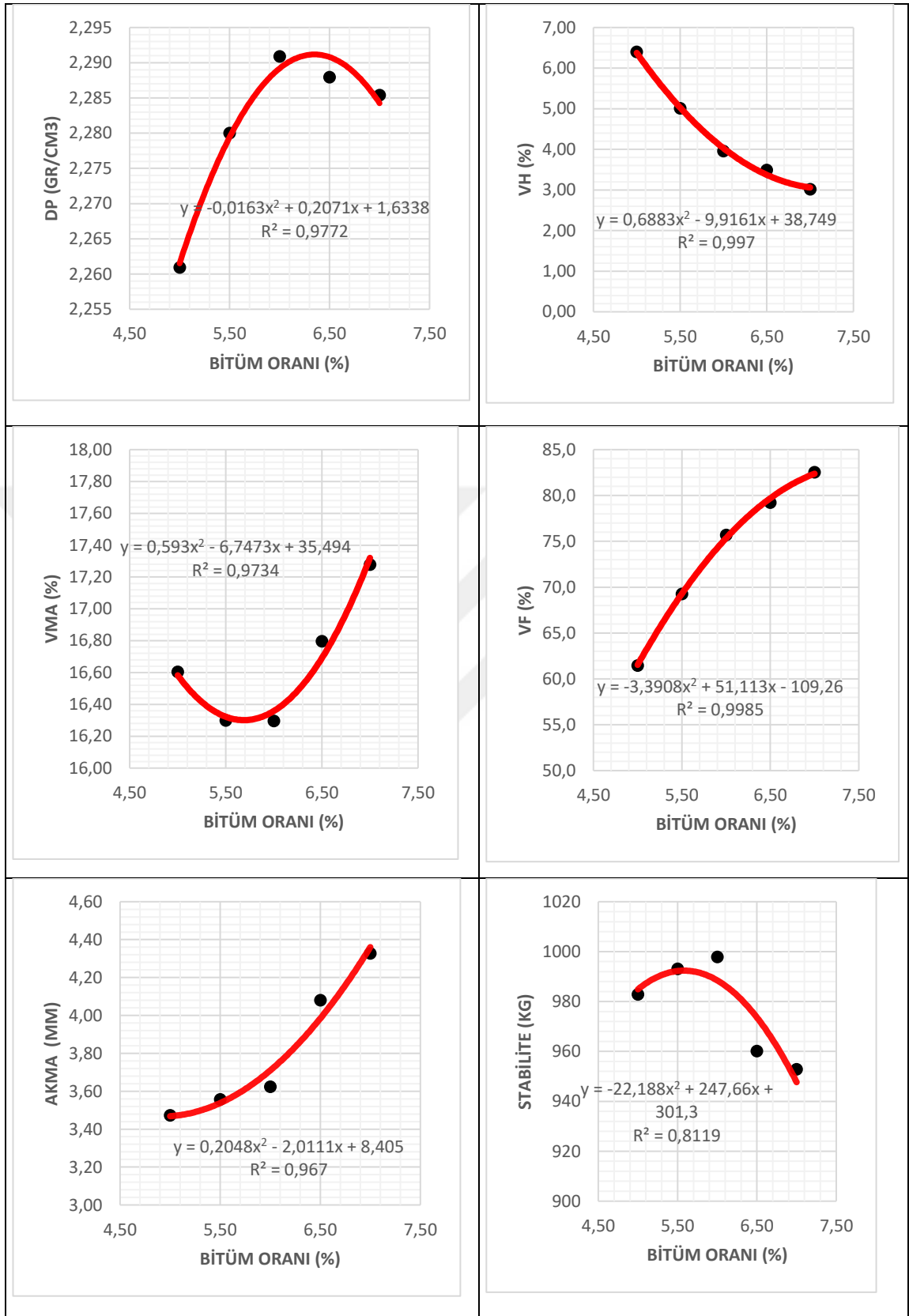
Şekil 4.5. %0.35 SF selülozik fiber karışımı



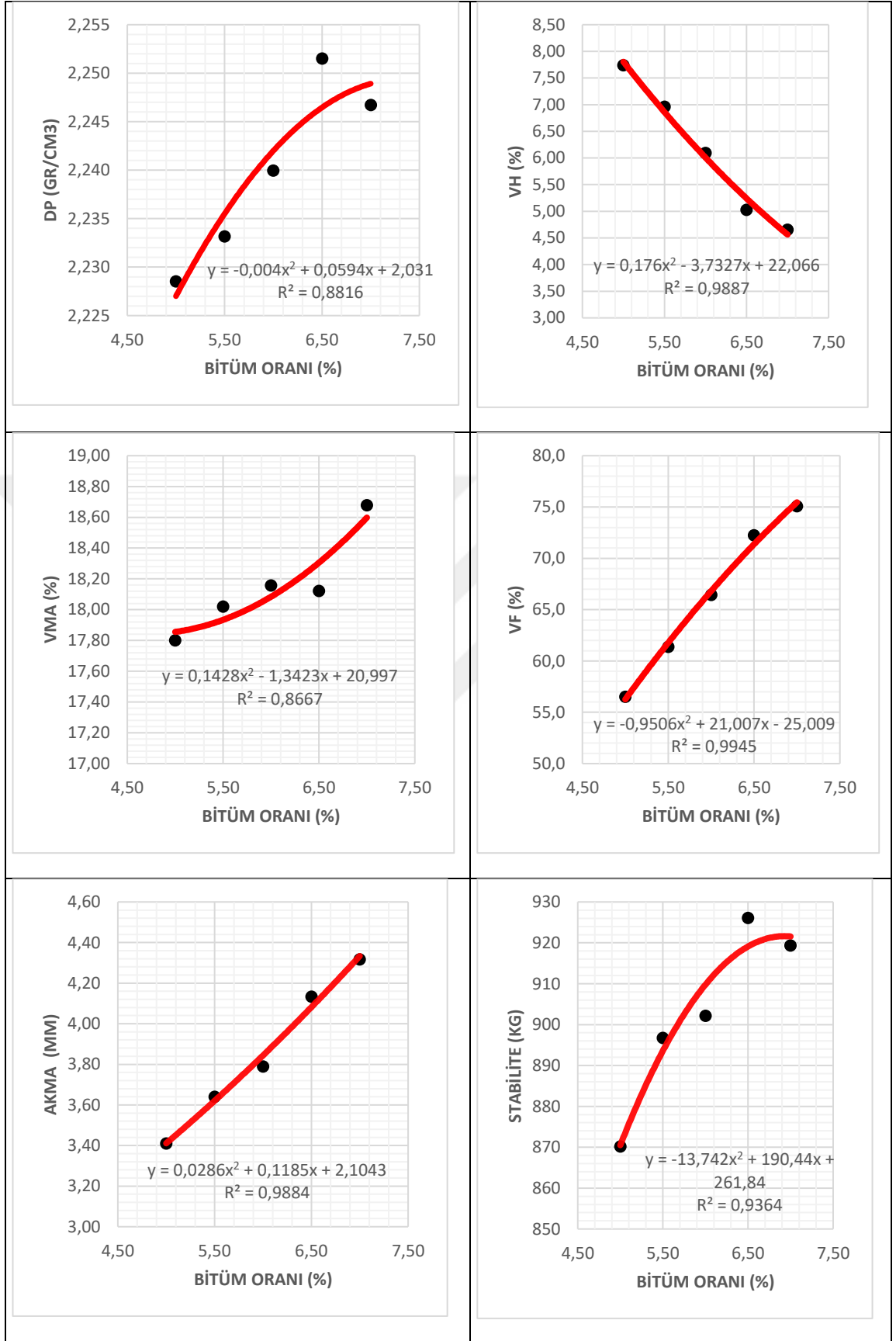
Şekil 4.6. %0.15 atık kağıt bardak karışımı



Şekil 4.7. %0.25 atık kağıt bardak karışımı



Şekil 4.8. %0.35 atık kağıt bardak karışımı



Şekil 4.9. %0.45 atık kağıt bardak karışımı

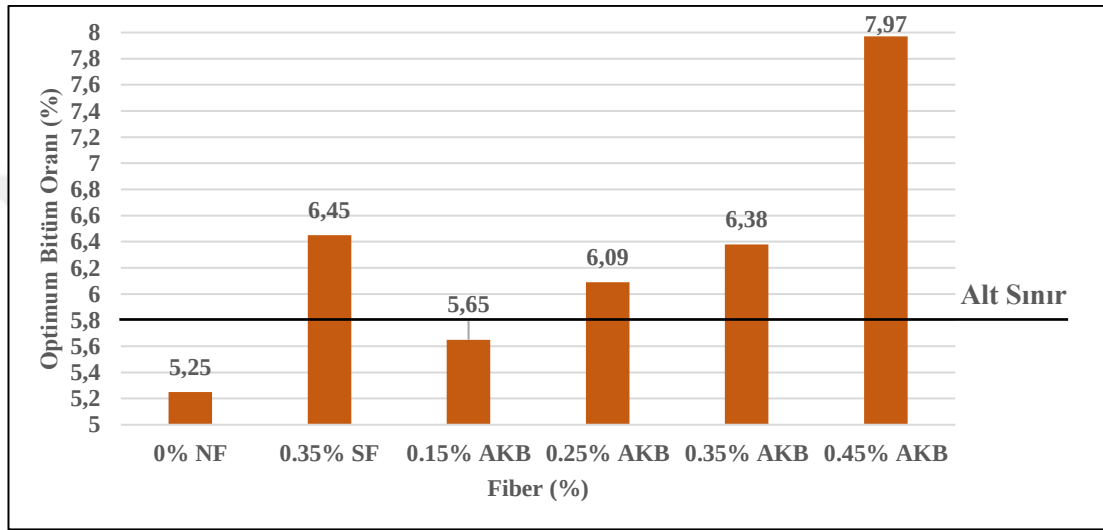
TMA karışımlarında optimum bitüm içeriğini belirlemek amacıyla genellikle hava boşluk oranı (Vh) kullanılmaktadır. Her bir TMA karışımının hava boşluk oranı (Vh) grafikten %3.5 seçildiğinde optimum bitüm oranları ayrı ayrı elde edilerek %3.5 hava boşluğuna karşılık gelen agregalar arası boşluk oranı (VMA) şartname limitini sağlamıştır. Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü TMA yönetmeliği aşınma tabakası için hava boşluk oranı %2-4 (sıcak iklim bölgelerinde %3-4), Tip-1A agrega karışımlarının agregalar arası boşluk (VMA) oranı minimum %16, bitümlü bağlayıcı oranı ise minimum %5.8 olmaktadır (KGM, 2013). Optimum bitüm oranına göre grafiklerdeki denklemlerden tespit edilen sonuçlar Çizelge 4.17’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.17. Grafiklerden okunan Marshall sonuçları

Karışımlar Özellikler	%0N F	%0.35 SF	%0.15 AKB	%0.25 AKB	%0.35 AKB	%0.45 AKB	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Stabilizör Oranı (%)	0.00	0.35	0.15	0.25	0.35	0.45	0.3- 1	-
Optimum Bitüm Oranı (%)	5.25	6.45	5.65	6.09	6.38	7.97	>5.80	TS EN 12697-1
Dp (g/cm ³)	2.325	2.348	2.311	2.297	2.292	2.25	-	-
Vh (%)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	2- 4	TSEN 12697-8
VMA (%)	14.51	16.05	15.25	16.07	16.58	19.37	>16.00	TS EN 12697-8
VFA (%)	75.84	79.45	77.07	78.21	78.82	82.03	-	-
Akma (mm)	4.54	4.47	4.74	4.34	3.91	4.87	-	-
Stabilite (kg)	1016	1032	982	1039	978	907	-	-

%0 NF (Fiber içermeyen), %0.35 SF (Selülozik fiber), %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.45 AKB (Atık kağıt bardak) içeren TMA karışımlarının optimum bitüm oranı (OBO) sırasıyla %5.25, %6.45, %5.65, %6.09, %6.38, %7.97 olduğu grafiklerdeki denklemlerden tespit edilmiştir (Şekil 4.10). KTS (2013) TMA yönetmeliğine göre optimum bitüm miktarının minimum %5.80 olması istenmektedir. Bu sonuçlara göre %0 NF ve %0.15 AKB ile hazırlanan TMA karışım serileri hariç diğer TMA karışımları istenilen optimum bitüm seviyesini sağlamaktadır. Optimum bitüm oranında Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları değerlendirildiğinde; aynı cins TMA karışımlarında stabilizatör kullanım oranının artması optimum bitüm oranını arttırırken hacim özgül ağırlıkları (Dp) azalma eğiliminde olmuştur. AKB ile

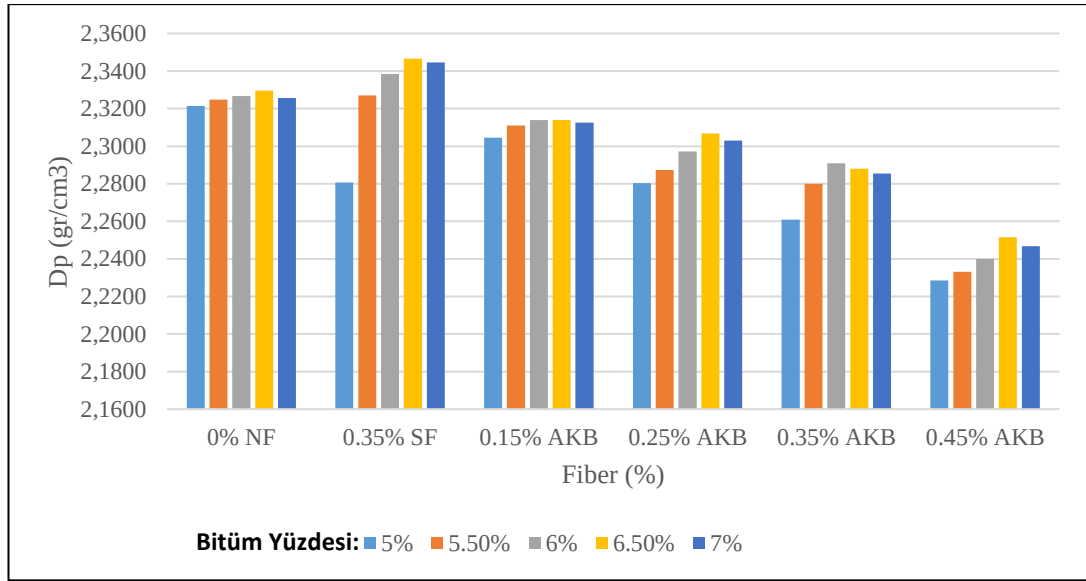
hazırlanan tüm karışım serilerinin optimum bitüm oranı, SF ile üretilmiş karışımdan daha az olduğu grafiklerden tespit edilmiştir. TMA karışımlarının VMA değerleri incelendiğinde AKB ile hazırlanan tüm karışım serilerinin agregalar arası boşluk (VMA) değerleri SF ile üretilmiş karışımdan daha fazla olduğu ve AKB oranı arttıkça VMA değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Numunelerin Vfa değerleri incelendiğinde yine stabilizör oranının artmasıyla doğrusal orantılı olarak Vfa değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Optimum bitüm oranı ile fiber yüzdesi arasındaki ilişki

Yoğunluk, BSK'ların en önemli özelliklerinden biridir. Asfalt üstyapıların yoğunluğu arttıkça dayanıklılık ve stabilite gibi fiziksel özellikleri de gelişmektedir (Selman ve Gürer, 2016).

Marshall yöntemiyle %5, %5.5, %6, %6.5, %7.0 bitüm oranlarında hazırlanan karışım serileri ile gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen D_p sonuçları, %0 NF, %0.35 SF ve %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 AKB ile hazırlanmış TMA karışımları için Şekil 4.11'de verilmiştir.



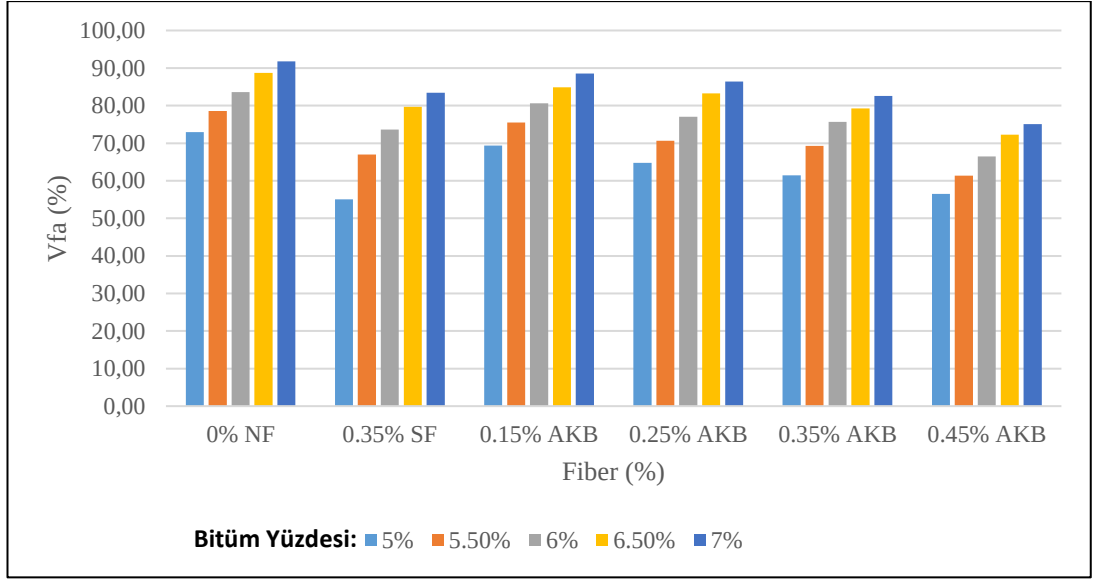
Şekil 4.11. Pratik özgül ağırlığı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki

En yüksek pratik özgül ağırlık değerleri %0 NF, %0.35 SF ve %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 AKB serileri için sırasıyla 2.330 gr/cm³, 2.346 gr/cm³, 2.314 gr/cm³, 2.307 gr/cm³, 2.290 gr/cm³ ve 2.250 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. En yüksek pratik özgül ağırlık değeri %0.35 SF ile hazırlanan numunelerden elde edilmiştir. AKB katkılı numuneler incelendiğinde en yüksek pratik özgül ağırlık değerinin %0.15 AKB serisinden elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.11). Bitüm yüzdesi ile pratik özgül ağırlık değerleri arasındaki ilişki oldukça karardır. Çalışmada NF numuneleri, herhangi bir lif katkısı içermeyen kontrol numuneleridir. Bitüm oranı arttıkça, pratik özgül ağırlık (D_p) değerlerinde küçük bir artış gözlemlenmektedir. SF numuneleri, %0.35 oranında selülozik fiber içermektedir. Bu numunelerde, bitüm oranı arttıkça D_p değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Selülozik fiberlerin bitümle olan etkileşimi ile asfalt yoğunluğunun arttığını söylemek mümkün olacaktır. AKB numuneleri, %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.45 oranlarında atık kağıt bardak lifi içermektedir. Bu numunelerde, lif oranı arttıkça D_p değerlerinde genel bir düşüş eğilimi gözlemlenmektedir. Bu, atık kağıt bardak liflerinin bitümle etkileşiminin yoğunluğu azaltıcı bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Özellikle %0.45 AKB içeren numunelerde, D_p değerlerinin diğer numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. NF numuneleri, herhangi bir lif katkısı içermediği için sıkıştırma sırasında daha homojen bir yapı sergileyebilir. Bitüm oranı arttıkça D_p değerlerinde küçük bir artış gözlemlenmesi, sıkıştırmanın etkin olduğunu ve bitümün numuneyi daha iyi bağladığını gösterebilir. TMA karışımlarda en yüksek D_p değeri elde edilen

Selülozik fiberin, sıkıştırma sırasında bitümün daha iyi dağılmasını sağlayabileceği ve numunenin yoğunluğunu artırabileceği, numuneyi daha homojen hale getirerek hava boşluklarını azaltacağı düşünülmektedir. Bu durum, selülozik fiberlerin sıkıştırma performansını olumlu yönde etkilediğini düşündürmektedir. Atık kağıt bardak lifleri, sıkıştırma sırasında bitümle etkileşime girerek numunenin yoğunluğunu azaltıcı bir etkiye sahip olabilir. Özellikle yüksek lif oranlarında (%0.35 ve %0.45 AKB), D_p değerlerinin düşük olması, sıkıştırma sırasında liflerin bitümle tam olarak bağlanamadığını ve hava boşluklarının arttığını gösterebilir. Bu durum, atık kağıt bardak liflerinin sıkıştırma performansını olumsuz etkilediğini düşündürmektedir.

Bitümle dolu boşluk miktarı (V_{fa}), asfalt karışımlarının plastisitesini, dayanıklılığını ve sürtünme katsayısını belirlemede çok önemli bir rol oynar. Ayrıca agrega parçacıklarının çevresinde koruyucu bir asfalt film kaplama sağlanmasına yardımcı olur. V_{fa} 'nın yetersiz olması durumunda, BSK'ların genel dayanıklılığı ve stabilitesi tehlikeye girme eğilimindedir. V_{fa} , asfalt karışımındaki bitümün doldurduğu boşlukların oranını ifade eder ve genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir. Bu değer, asfaltın dayanıklılığı, suya karşı direnci ve genel performansı açısından önemlidir. (Akbulut vd., 2012).

Şekil 4.12 incelendiğinde tüm TMA karışım serilerinde bitüm oranı arttıkça V_{FA} 'nın arttığı görülmektedir. Bu, bitüm oranı arttıkça boşlukların daha fazla bitümle dolduğunu göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri (AKB), özellikle düşük lif oranlarında (%0.15), SF'ye göre daha yüksek V_{FA} değerleri sergilemektedir. Ancak, yüksek lif oranlarında (%0.45), V_{FA} değerleri NF ve SF'ye göre düşmektedir. Fiber içermeyen numuneler (NF), en yüksek V_{FA} değerlerini sergilemektedir. Bu durum, liflerin boşlukları doldurma verimliliğini azaltabileceğini göstermektedir.

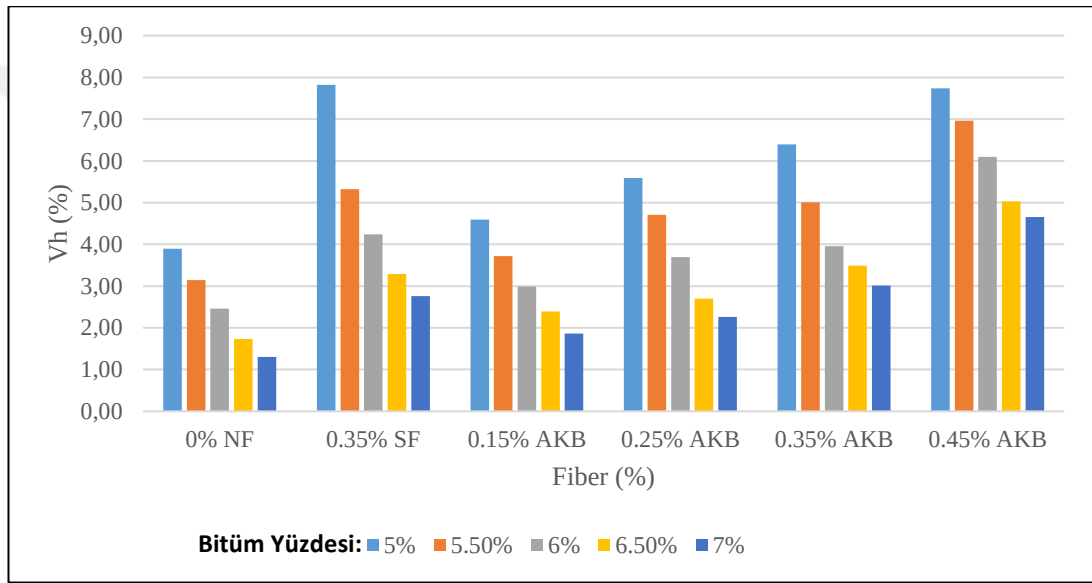


Şekil 4.12. V_{fa} ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki

Boşluk yüzdesi (V_h), bitümlü sıcak karışımlar için önemli bir özelliktir. KTŞ (2013)'de boşluk oranı için alt ve üst sınır %3-5 olarak belirlenmiştir. Bu sınır değerlerin belirlenmesindeki amaç olası kuma bozulmalarının önlenmesidir. Boşluk yüzdesi için üst sınır belirlenmesinin nedeni, katmanın su geçirimsizliği ve yeterli stabiliteyi sağlamasıdır (Selman ve Gürer, 2016).

%0 NF (Fiber içermeyen), %0.35 SF (Selülozik fiber), %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.45 AKB (Atık kağıt bardak) içeren TMA karışımlarının %5.0, %5.5, %6, %6.5, %7 bitüm oranlarında maksimum V_h değerleri sırasıyla %3.93, %7.82, %4.63, %4.74, %6.43, %7.74 olduğu grafiklerdeki denklemlerden tespit edilmiştir (Şekil 4.13) KTŞ (2013), TMA yönetmeliği aşınma tabakası için hava boşluk oranı %2-4 (sıcak iklim bölgelerinde %3-4) olması gerekmektedir. Aynı cins stabilizör kullanılarak üretilen TMA karışım serileri incelendiğinde bitüm oranı arttıkça V_h değerinin azaldığı yine stabilizör oranı arttıkça V_h değerinin düştüğü belirlenmiştir. %0 NF TMA serisinde bitüm oranı arttıkça V_h değerleri azalmaktadır. Bu, bitüm oranı arttıkça hava boşluklarının azaldığını ve karışımın daha yoğun hale geldiğini göstermektedir. %0.35 SF TMA karışımlarda, V_h değerleri, %0 NF TMA numunelerine göre artırmıştır. Bu, selülozik fiberlerin karışımında daha fazla hava boşluğu oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri, V_h değerlerini %0 NF numunelerine göre artırmıştır. Ancak, lif oranı arttıkça V_h değerlerindeki artış daha belirgin hale gelmiştir. Düşük lif oranlarında (%0.15), AKB numuneleri SF'ye göre daha düşük V_h değerleri

sergilemektedir. Ancak, yüksek lif oranlarında (%0.45), AKB numuneleri SF'ye göre daha yüksek V_h değerleri sergilemektedir. Selülozik fiberler (SF), V_h değerlerini NF'ye göre önemli ölçüde artırmaktadır. Bu, selülozik fiberlerin karışımında daha fazla hava boşluğu oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri (AKB), özellikle yüksek lif oranlarında (%0.45), V_h değerlerini NF ve SF'ye göre belirgin şekilde artırmaktadır. Bu, atık kağıt bardak liflerinin karışımında daha fazla hava boşluğu oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Fiber içermeyen numuneler (NF), en düşük V_h değerlerini sergilemektedir. Bu, liflerin karışımında hava boşluklarını artırdığını göstermektedir.

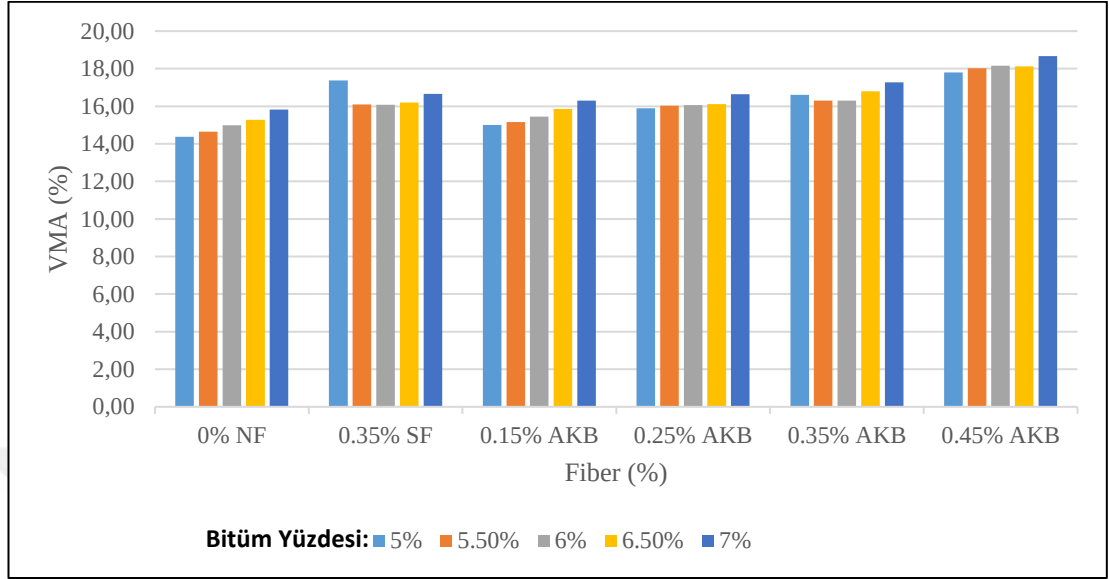


Şekil 4.13. V_h ve bitüm yüzdeleri arasındaki ilişki

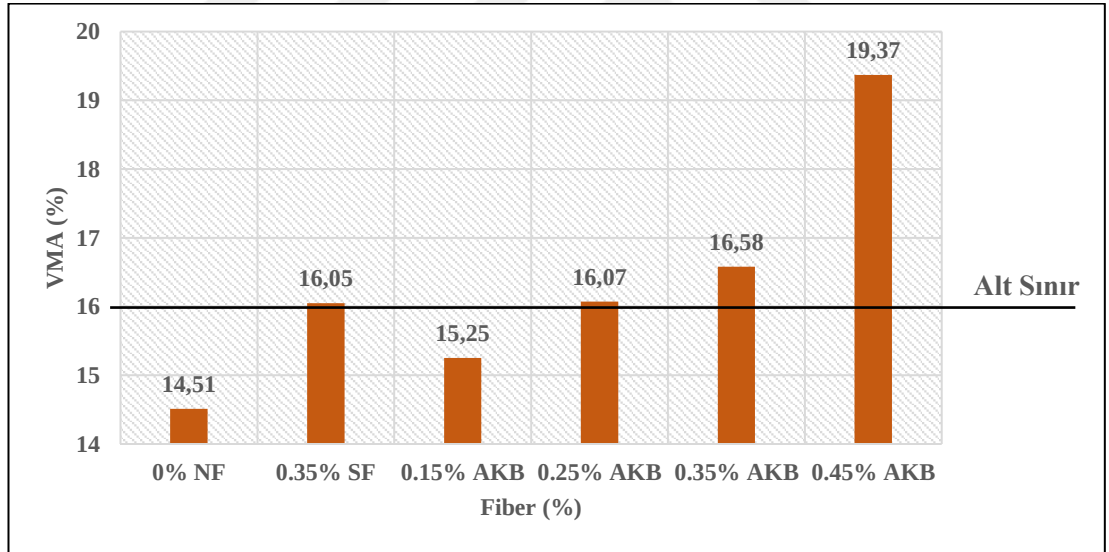
Mineral agregalar arasındaki boşluk değeri (VMA) sıkıştırılmış kaplama karışımları içerisindeki bitümle dolu boşluklar da dâhil olmak üzere agrega danecikleri arasındaki hava boşluklarıdır. Mineral agregalar arasındaki boşluk karışımındaki bitüm ve hava boşluğu için gerekli olan hacime tekabül eden kullanılabilir hacmi temsil eder. Dolayısıyla mineral agregalar arasındaki boşluk arttıkça agregalar üzerindeki bitüm film kalınlığının artacağı ve karışımın durabilitesinin yükseleceği söylenebilir (Wang vd., 2010).

TMA aşınma tabakasında kullanılacak agregalar için mineral agregalar arası minimum boşluk yüzdesi (VMA) değeri KTŞ (2013) minimum %16 olarak tanımlanmıştır. Mineral agregalar arasındaki boşluklar ile bitüm yüzdesi ve elyaf oranları arasındaki

ilişki Şekil 4.14'te verilmiştir. Belirlenen optimum bitüm oranlarına göre belirlenen VMA değerleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.14. VMA yüzdeleri ile bitüm içeriği arasındaki ilişki

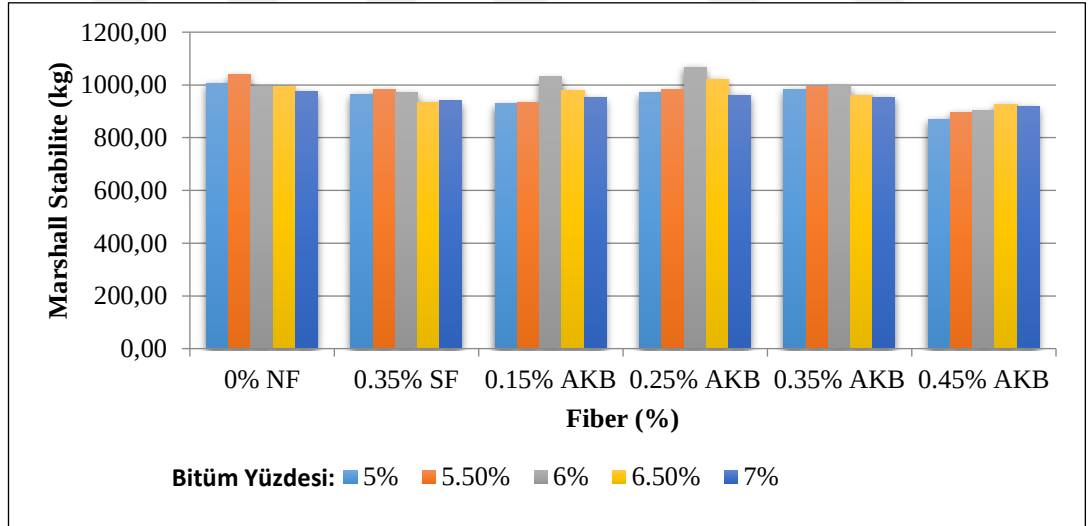


Şekil 4.15. VMA ile fiber içeriği arasındaki ilişki

%0.15 NF TMA karışım serisinde VMA değeri 14.51 olarak belirlenmiştir. Bu, lif içermeyen numunelerde mineral agregalar arasındaki boşlukların lif içeren serilere göre daha az olduğunu göstermektedir. %0.35 SF TMA karışım serisinde VMA değeri 16.05 olarak hesaplanmıştır. Bu, selülozik fiberin mineral agregalar arasındaki boşlukları artırdığını göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri, lif oranı arttıkça VMA değerlerini artırmaktadır. Bu, liflerin mineral agregalar arasındaki boşlukları artırdığını göstermektedir. Selülozik fiberler (SF), VMA değerlerini NF'ye göre

belirgin şekilde artırmaktadır. Bu, selülozik fiberlerin mineral agregalar arasındaki boşlukları artırdığını göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri (AKB), özellikle yüksek lif oranlarında (%0.45), VMA değerlerini NF ve SF'ye göre belirgin şekilde artırmaktadır. Bu, atık kağıt bardak liflerinin mineral agregalar arasındaki boşlukları artırdığını göstermektedir. Fiber içermeyen numuneler (NF), en düşük VMA değerlerini sergilemektedir. Bu, liflerin mineral agregalar arasındaki boşlukları artırdığını göstermektedir.

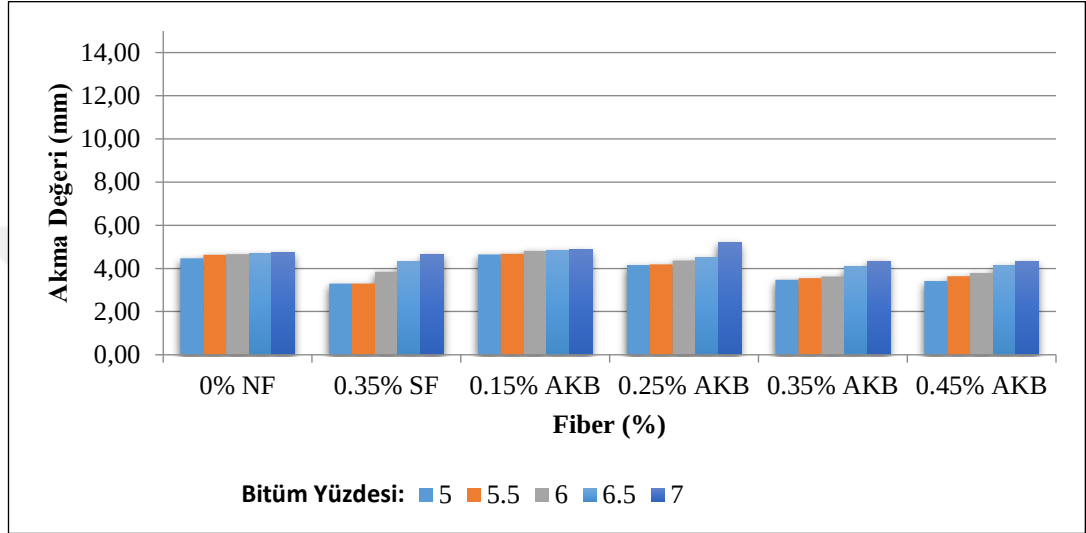
Çalışmada her bir asfalt oranı seviyesi için üç adet TMA numunesi hazırlanmış ve Marshall testlerine tabi tutulmuştur. Tüm numuneler için ağırlık, sudaki ağırlık ve suya doymuş kuru yüzey ağırlık ölçümleri alınmıştır. Elde edilen verilere dayanarak, asfalt içeriği yüzdesi ile Marshall stabilitesi, Pratik özgül ağırlık (D_p), bitümle dolu boşluk oranı (V_f) ve boşluk oranı (V_h) arasındaki ilişkileri incelemek için grafikler çizilmiştir. Daha sonra tasarım gruplarının her biri için V_h grafiklerinden %3.5 V_h değeri esas alınarak optimum bitüm içerikleri belirlenmiştir. MS, asfalt içeriği ve stabilizör oranları arasındaki korelasyon Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. MS ve bitüm yüzdesi arasındaki ilişki

%0.15 NF TMA karışım serisinde, bitüm oranı arttıkça Marshall Stabilite değerleri genel olarak azalmaktadır. Bu, bitüm oranı arttıkça karışımın daha esnek hale geldiğini ve stabilitesinin düştüğünü gösterebilir. Selülozik fiberler, Marshall Stabilite değerlerini %0.15 NF numunelerine göre düşürmüştür. Atık kağıt bardak lifleri, Marshall Stabilite değerlerini %0.15 NF numunelerine göre düşürmüştür. Ancak, lif

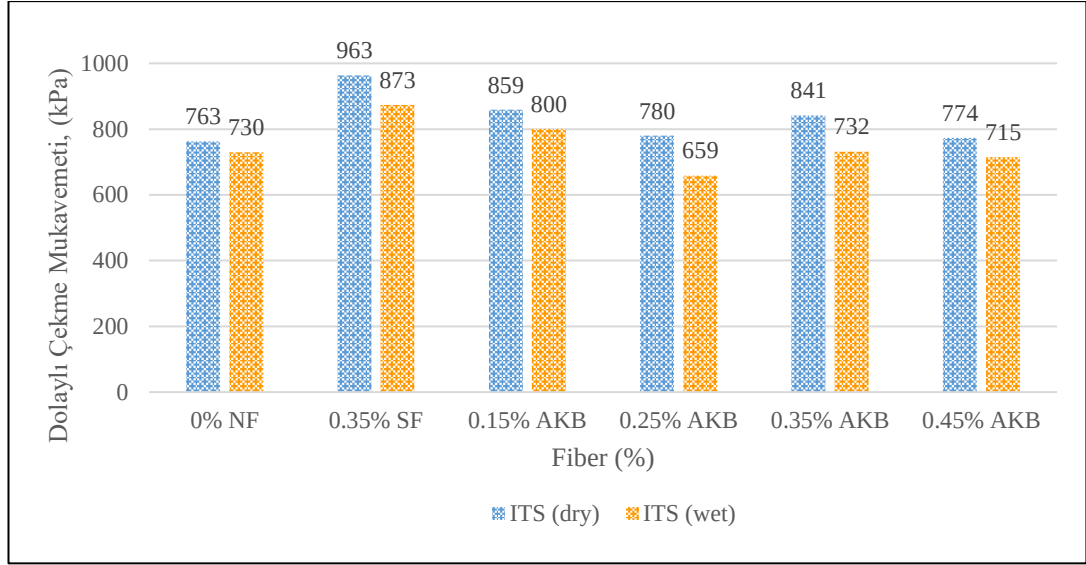
oranı arttıkça Marshall Stabilite değerlerindeki düşüş daha belirgin hale gelmiştir. Selülozik fiberler (SF), Marshall Stabilite değerlerini NF'ye göre düşürmektedir. Atık kağıt bardak lifleri (AKB), Marshall Stabilite değerlerini NF ve SF ile hazırlanmış numunelerine göre düşürmektedir. Ancak, bu düşüş bitüm oranı arttıkça azalmaktadır. Fiber içermeyen numuneler (NF), en yüksek Marshall Stabilite değerlerini sergilemektedir. Bu, liflerin karışımın stabilitesini düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 4.17. Akma yüzdeleri ile bitüm içeriği arasındaki ilişki

4.7.2. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve su hasarı deney sonuçları

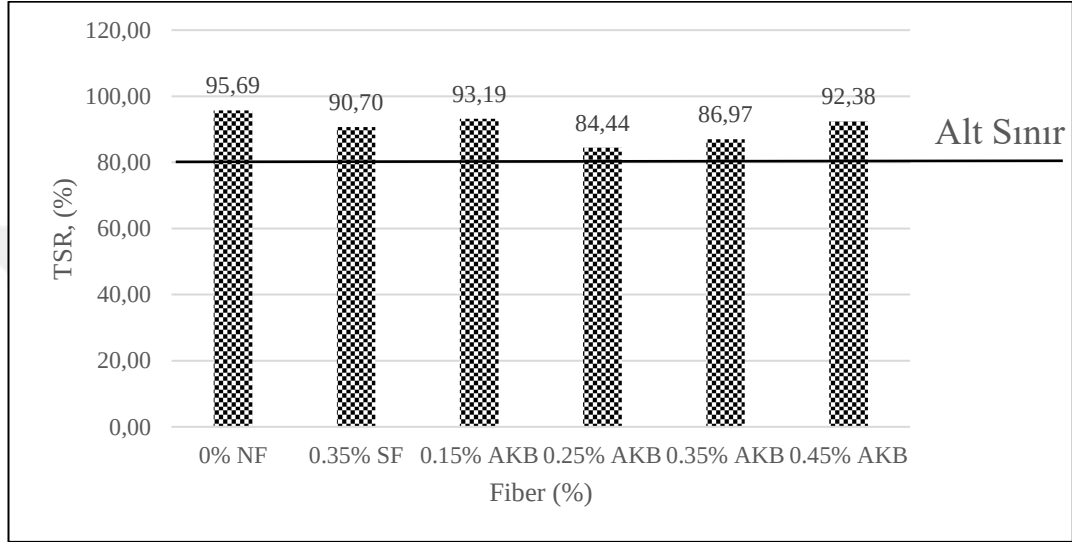
Çalışmada şartlandırılmış ve şartlandırılmamış AKB katkılı ve kontrol numunelerine ITS testi uygulanmış ve suyun neden olduğu kaplama bozulmasına karşı dirençleri belirlenmiştir. ITS ve TSR değerleri sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.18. TMA karışımlarının dolaylı çekme mukavemeti değerleri

Şekil 4.18 incelendiğinde farklı fiber katkılarına sahip TM numunelerinin Kuru (dry) ve Islak koşullardaki dolaylı çekme mukavemeti değerlerini göstermektedir. Dolaylı çekme mukavemeti, asfalt karışımın çekme dayanımını ölçer ve özellikler çatlak direnci açısından önemlidir. Daha yüksek değerler, daha dayanıklı bir asfalt karışımını gösterir. %0.15 NF numunelerinde, Kuru koşullarda dolaylı çekme mukavemeti 763 ve ıslak koşullarda 730 olarak ölçülmüştür. Islak koşullarda mukavemetin düşmesi, suyun asfalt karışımının dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Kuru koşullarda dolaylı çekme mukavemeti 963 ve ıslak koşullarda 873 olarak ölçülmüştür. Selülozik fiberler hem kuru hem de ıslak koşullarda %0.15 NF'ye göre daha yüksek mukavemet değerleri sağlamıştır. Bu, selülozik fiberlerin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir. AKB numuneleri, %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.45 oranlarında atık kağıt bardak lifi içermektedir. Kuru ve ıslak koşullardaki dolaylı çekme mukavemeti değerleri; %0.15 AKB: Kuru 859, Islak 800, %0.25 AKB: Kuru 780, Islak 659, %0.35 AKB: Kuru 841, Islak 732, %0.45 AKB: Kuru 774, Islak 715 olarak belirlenmiştir. Atık kağıt bardak lifleri, %0.15 NF'ye göre genel olarak daha yüksek mukavemet değerleri sağlamıştır. Ancak, lif oranı arttıkça mukavemet değerlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Selülozik fiberler hem kuru hem de ıslak koşullarda NF'ye göre belirgin şekilde daha yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır. Atık kağıt bardak lifleri, NF'ye göre hem kuru hem de ıslak koşullarda daha yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır. Atık kağıt bardak lifleri, SF'ye göre hem kuru hem de ıslak koşullarda daha düşük mukavemet değerleri sergilemektedir. Selülozik fiberler (SF), hem kuru hem de ıslak koşullarda NF'ye göre belirgin şekilde daha yüksek dolaylı çekme

mukavemeti değerleri sağlamaktadır. Bu, selülozik fiberlerin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir. Atık kağıt bardak lifleri (AKB), NF'ye göre hem kuru hem de ıslak koşullarda daha yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır. Ancak, SF'ye göre daha düşük mukavemet değerleri sergilemektedir. Fiber içermeyen numuneler (NF), en düşük mukavemet değerlerini sergilemektedir. Bu, liflerin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir.

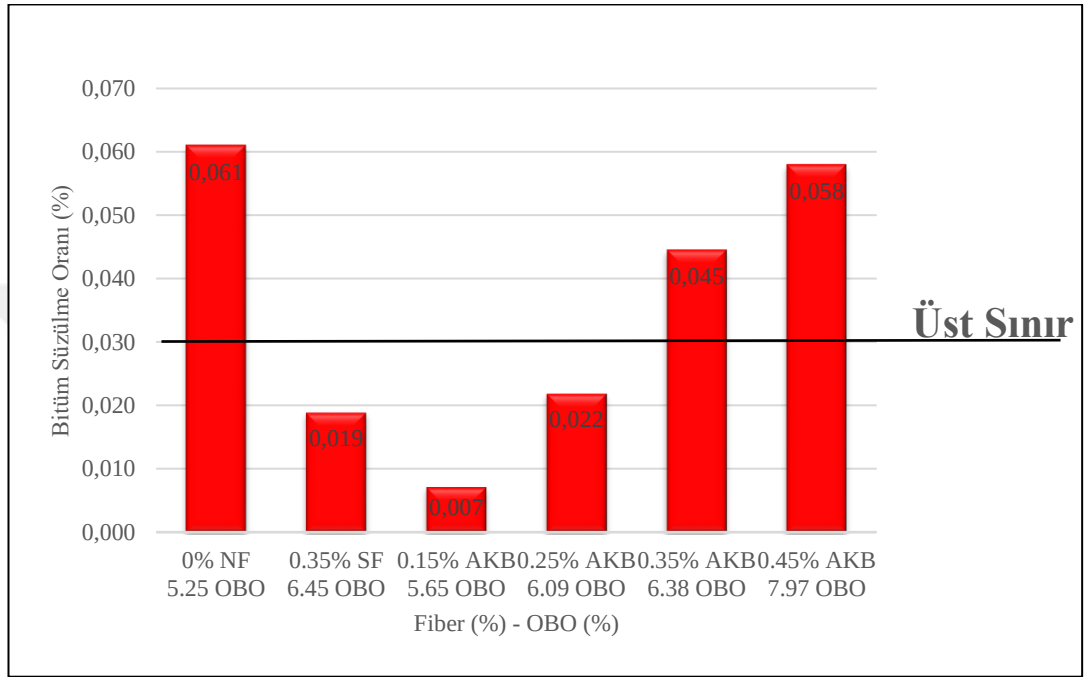


Şekil 4.19. Çekme mukavemeti oranı sonuçları

Şekil 4.19 incelendiği zaman AKB katkısının artmasıyla birlikte TSR değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler %0.35 SF karışımına göre sırasıyla %2.74 artış, %6.9 azalış, %4.11 azalış ve %1.85 artıştır. Bu sonuçlara göre en yüksek TSR değeri 0.15% AKB katkılı karışımlarda gözlenmiştir. Bu nedenle suyun neden olduğu bozulmalara karşı en dayanıklı karışımların %0.15 AKB katkılı karışımlar olduğu söylenebilir. Ayrıca AKB katkılı karışımların TSR değerlerinin %80'in üzerinde olması AKB katkısının TMA'da su kaynaklı bozulmalara karşı direncini artırıcı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4.7.3. Schellenberg bitüm süzülme deneyi sonuçları

Bitüm süzülme deney sonuçlarına göre %0.35 SF, %0.15 AKB ve %0.25 AKB katkıli numunelerin KTŞ (2013) şartnamesine uygun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.20’de bitüm süzülme deney sonuçları görülmektedir.



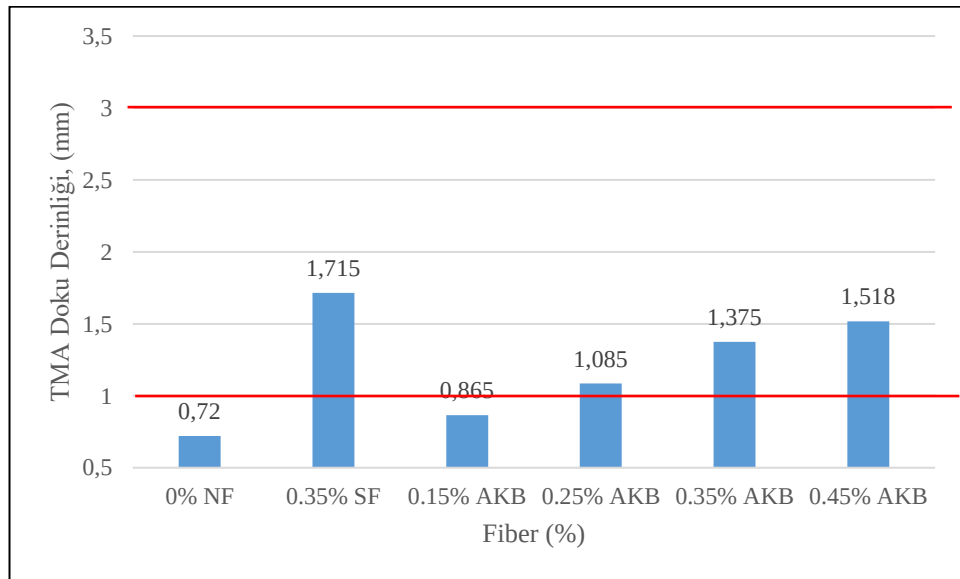
Şekil 4.20. Schellenberg deney sonuçları

Deney sonuçları incelendiğinde lif kullanımı olmayan numunelerde (NF) bitüm süzülme oranının %0.061 olduğu ve Lif katkısı olmadığından bitüm süzülmesinin belirgin olduğu, dolayısıyla süzülme oranın tüm numuneler içerisinde en yüksek değer olduğu görülmektedir. Selülozik Fiber (SF-0.35%) ile hazırlanmış numuneler incelendiğinde bitüm süzülme oranının %0.019 olduğu ve lif kullanılmayan numunelere kıyasla süzülme oranının %68 oranında azalmış olduğu görülmektedir. Buda selülozik fiberin bitüm tutuma kabiliyetinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Atık kağıt bardak ile hazırlanan numunelere ait bitüm süzülme oranları %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 AKB oranı için sırasıyla %0.007, %0.022, %0.045 ve %0.058 olarak belirlenmiştir. AKB içeren numuneler bitüm süzülme oranı açısından incelendiğinde AKB oranı arttıkça bitüm süzülmesi oranının arttığı görülmektedir.

Lif içeriği, bitüm süzülmesini açık şekilde azaltmaktadır. Ancak bu etki, sadece lifin varlığıyla değil, aynı zamanda türü ve miktarıyla da ilişkili olduğu görülmektedir. %0.35 SF katkılı numunelerin, sabit ve başarılı bir performans gösterdiği, Süzülme oranının %0.019 olup hem düşük hem de tutarlı olduğu görülmektedir. Bunun, selülozik lifin poroz yapısıyla ilişkili olduğu ve bitümü absorbe etme yeteneğini yansıttığı düşünülmektedir. AKB ile hazırlanan numunelerde AKB düşük dozajda (%0.15) en başarılı sonucu verirken (%0.007), dozaj arttıkça süzülme de artmıştır. Bu durum, aşırı AKB lifin, bitüm ile yeteri kadar kaplanma sağlayamadığını, AKB'nin yapısal formunun ve yüzey özelliklerinin, selülozik lif kadar başarılı olmadığı şeklinde değerlendirilmektedir. OBO değeri (bitüm miktarı) da süzülme etki etmektedir. AKB katkısı arttıkça OBO da artmıştır (5.65-7.97). Bu, karışımın fazla bitüm içermesiyle birlikte süzülmeye yatkın hale geldiğini göstermektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından en ideal lif tipi ve oranının %0.15 AKB olduğu görülmektedir.

4.7.4. Yüzey dokusu (Kum yama) deney sonuçları

Kum yama deney sonuçları değerlendirildiğinde sonuçlarına göre %0 NF ve %0.15 AKB numuneleri dışındaki karışımların KTŞ (2013) şartnamesine uygun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.21'de kum yama deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.21. Yüzey dokusu deney sonuçları

Lif kullanımı olmayan (NF) numuneler incelendiğinde doku derinliğinin 0.72 mm olduğu, bu değerin şartname (KGM,2013) limitleri altında kaldığı; yüzey dokusunun yeterli olmadığı görülmektedir. Bu, lif olmadan karışımın daha homojen yayıldığını ve mikro pürüzlülüğün az olduğunu göstermektedir. Selülozik lif kullanılan numunelerde doku derinliği 1.715 mm olarak belirlenmiştir. Bunun, liflerin karışımındaki boşluklu yapısı ve stabil agrega yapısı nedeniyle yüzeyin daha pürüzlü bir yapıya geldiğini göstermektedir. Bu durum özellikle kayma direnci açısından olumlu bir gelişmedir.

Atık kağıt bazlı lif (AKB) kullanılan numunelerde düşük dozajda (%0.15 AKB) doku derinliğinin yetersiz (0.865 mm) olduğu, %0.25 ve üzeri katkı ile birlikte doku derinliğinin sınırlar içinde ve artan şekilde gözlendiği görülmektedir.

TMA’da yüzey dokusu için minimum 1 mm, maksimum 3 mm olarak belirlenmiştir (KTŞ, 2013). 0.35% SF ve 0.45% AKB, yüzey dokusu açısından en iyi performansı göstermektedir. Selülozik fiber hem bitüm süzülmesini azaltmıştır hem de doku derinliğini en fazla artırmıştır. Bu, çok yönlü fayda sağladığını göstermektedir. AKB’ler, uygun dozajda kullanıldığında ($\geq 0.25\%$), yeterli yüzey dokusu oluşturabilmektedir. Bu da bu katkının ekonomik ve sürdürülebilir alternatif olduğunu desteklemektedir.

Genel olarak, yüzey dokusu açısından selülozik fiber (%0.35) en iyi sonucu verirken, Atık kâğıt lifi, %0.25-0.45 aralığında kullanıldığında uygun yüzey dokusu sağladığı görülmektedir. Lif katkısı hem süzülmeyi azaltmakta hem de doku derinliğini artırmaktadır, bu da TMA’nın performansına doğrudan katkı sağlamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada TMA'da AKB kullanımının karışımların Marshall özellikleri, nem hasarı, bitüm süzülme ve yüzey doku derinliği performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca AKB katkılı karışımlara uygulanan deney sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur;

- AKB lif oranı arttıkça optimum bitüm oranının arttığı, pratik özgül ağırlık değerlerinin düştüğü, asfalt içeriği arttıkça asfaltla dolu boşluk oranlarının arttığı, AKB oranı arttıkça asfaltla dolu boşluk oranının azaldığı, boşluk miktarlarının arttığı belirlenmiştir. KTŞ (2013)'te TMA kaplamalar için belirlenen VMA değeri minimum 16'dır. VMA sonuçları incelendiğinde AKB oranı arttıkça VMA değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada süzülme değerleri incelendiğinde bitüm oranı ve AKB oranı arttıkça süzülmenin arttığı tespit edilmiştir. Kum yama değerleri incelendiğinde AKB oranı arttıkça yüzeyin daha pürüzlü hale geldiği belirlenmiştir.
- Optimum bitüm oranında Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları değerlendirildiğinde; aynı cins TMA karışımlarında stabilizatör kullanım oranının artması optimum bitüm oranını arttırırken hacim özgül ağırlıkları (Dp) azalma eğiliminde olmuştur. AKB ile hazırlanan tüm karışım serilerinin optimum bitüm oranı, SF ile üretilmiş karışımdan daha az olduğu grafiklerden tespit edilmiştir. TMA karışımlarının VMA değerleri incelendiğinde AKB ile hazırlanan tüm karışım serilerinin agregalar arası boşluk (VMA) değerleri SF ile üretilmiş karışımdan daha fazla olduğu ve AKB oranı arttıkça VMA değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Numunelerin Vfa değerleri incelendiğinde bitüm oranı arttıkça Vfa'nın arttığı, stabilizör oranının artmasıyla doğrusal orantılı olarak Vfa değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.
- %0 NF (Fiber içermeyen), %0.35 SF (Selülozik fiber), %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.45 AKB (Atık kağıt bardak) içeren TMA karışımlarının optimum bitüm oranı (OBO) sırasıyla %5.25, %6.45, %5.65, %6.09, %6.38, %7.97 olduğu grafiklerdeki denklemlerden tespit edilmiştir (Şekil 6.10). KTŞ (2013) TMA yönetmeliğine göre optimum bitüm miktarının minimum %5.80 olması istenmektedir. Bu sonuçlara göre %0 NF ve %0.15 AKB ile hazırlanan TMA

karışım serileri hariç diğer TMA karışımları istenilen optimum bitüm seviyesini sağlamaktadır.

- Bitüm miktarı ile pratik özgül ağırlık arasındaki ilişki oldukça tutarlı bir yapı sergilemektedir. Lif içermeyen kontrol numuneleri (NF) bu çalışmada karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Bitüm oranındaki artışa paralel olarak, pratik özgül ağırlıkta (Dp) hafif bir yükselme gözlemlenmiştir. %0.35 oranında selülozik fiber içeren SF numunelerinde ise bitüm oranı arttıkça Dp değerlerinde daha belirgin bir artış meydana gelmiş, bu da selülozik liflerin asfalt yoğunluğunu artırma potansiyelini ortaya koymuştur. Atık kâğıt bardak lifi (AKB) katkısı içeren numunelerde (%0.15, %0.25, %0.35, %0.45), lif miktarı arttıkça Dp değerlerinde genel olarak bir azalma eğilimi gözlemlenmiş, bu durum AKB'nin sıkıştırma esnasında karışım yoğunluğunu düşürebileceğini göstermiştir. Özellikle yüksek dozlarda (%0.35 ve %0.45), liflerin bitümle tam etkileşime girememesi sonucu hava boşluklarının arttığı ve bu durumun karışımın yoğunluğunu olumsuz etkilediği düşünülmektedir.
- Tüm TMA karışımlarında bitüm oranı yükseldikçe VFA (boşlukların bitümle dolma oranı) da artış göstermiştir. Düşük lif oranlarında (%0.15 AKB), VFA değerleri SF numunelerine göre daha yüksekken; yüksek lif oranlarında (%0.45), bu değerler hem NF hem de SF numunelerinin gerisine düşmüştür. Bu da liflerin boşlukları doldurma etkinliğinin lif oranı arttıkça azaldığını işaret etmektedir. AKB katkısı, %0.45 oranında kullanıldığında Vh (hava boşluğu) değerlerini kayda değer biçimde artırarak daha gözenekli bir yapı oluşmasına yol açmıştır. Buna karşılık, lif içermeyen karışımlar en düşük Vh değerlerine sahip olmuş, bu da lif katkısının hava boşluklarını artırıcı etkisini doğrulamaktadır.
- VMA (mineral agrega arası boşluk oranı) değerleri incelendiğinde, lif katkısı arttıkça bu oran da arttığı görülmüştür. Hem SF hem de AKB katkıları, NF numunelerine kıyasla daha yüksek VMA değerleri üretmiştir. Bu da liflerin, agrega iskeleti arasında daha geniş boşluklar oluşturduğunu göstermektedir. Marshall Stabilité sonuçlarında ise hem SF hem de AKB katkılarının stabilizeyi azalttığı gözlemlenmiştir. Özellikle AKB oranı arttıkça bu düşüş daha belirgin hale gelmiştir. Bununla birlikte, bitüm oranı yükseldikçe stabilitedeki bu azalma bir miktar dengelenmiştir.

- Islak ve kuru ortam koşullarında yapılan dolaylı çekme mukavemeti testlerine göre, AKB katkısı NF'ye kıyasla daha yüksek dayanım sergilerken, SF katkılı karışımlar daha da üstün performans göstermiştir. Bu da selülozik fiberin çekme dayanımı üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. AKB katkısının farklı dozajlarda kullanımıyla elde edilen TSR (Nem Hassasiyeti) değerleri de değişkenlik göstermiştir. Özellikle %0.15 AKB katkılı karışım, en yüksek TSR değerini vermiş ve bu oranın su kaynaklı bozulmalara karşı en dayanıklı karışımı temsil ettiği belirlenmiştir. Tüm AKB katkılı karışımların %80'in üzerinde TSR değerine sahip olması ise bu katkının TMA'da nem direncini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır.
- Bitüm süzülmesi açısından değerlendirildiğinde, en düşük oran %0.15 AKB katkılı karışımında gözlemlenmiş (%0.007). Lif oranı arttıkça süzülme oranı da artış göstermiştir. Bu da AKB liflerinin belirli bir dozajın üzerinde bitümle yeterli etkileşim kuramadığını düşündürmektedir. Aynı zamanda OBO (organik bağlayıcı oranı) değerlerinin de lif oranıyla birlikte yükselmesi (%5.65'ten %7.97'ye) süzülmeyi artıran diğer bir faktör olmuştur. Ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirildiğinde, en uygun katkı tipi ve oranının %0.15 AKB olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Doku derinliği açısından yapılan değerlendirmelerde, düşük dozajda (%0.15 AKB) yüzey dokusu yetersiz kalırken, %0.25 ve üzeri AKB katkıları ile doku derinliği artış göstermiştir. TMA için belirlenen minimum doku derinliği olan 1 mm'ye en yakın ve üzerinde sonuçlar %0.35 SF ve %0.45 AKB katkılı karışımlarda elde edilmiştir. SF katkısı hem süzülmeyi azaltması hem de doku derinliğini artırması açısından çok yönlü bir katkı sağlamıştır. AKB ise uygun oranlarda kullanıldığında (%0.25-%0.45) yeterli yüzey dokusu oluşturabilmektedir. Genel olarak, lif katkılarının süzülmeyi azaltmak ve yüzey dokusunu iyileştirmek suretiyle TMA performansını artırdığı görülmektedir.

Sonuç olarak, AKB'nin TMA karışımlarında kullanılması, nem dayanımını artırmakta, Marshall stabilitesi ve özellikle bitüm süzülme performansını geliştirmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, kağıt atıklarıyla desteklenen TMA özelliklerini doğrulamak için "Tekerlek İzinde Oturma" testinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design*, 32(10), 4844-4849. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>
- Akbulut, H., Güre, C., Çetin, S., & Elmacı, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.069>
- Akbulut, S. (2015). *Tek Kullanımlık Plastik Bardaklardan Sıvı Gıdalara Mikroplastik ve Nanoplastik Geçişinin Tespiti*. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Akpolat, M. (2014). *Ilık Karışım Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Aksoy, A., Iskender, E., & Kahraman, H. T. (2012). Application of the intuitive k-NN Estimator for prediction of the Marshall Test (ASTM D1559) results for asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 34, 561-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.091>
- Ameli, A., Babagoli, R., Norouzi, N., Jalali, F., & Mamaghani, F. P. (2020). Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*, 236, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117557>
- Anonim (2020). Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Don Kaybı Belirlenmesi. <https://volkanatabey.com.tr/magnezyum-sulfat-cozeltisinde-don-kaybi-belirlenmesi/>. (Son erişim tarihi: 07 Temmuz 2022)
- Anonim (2025). What is ELVALOY™ 5160 Copolymer? <https://www.dow.com/en-us/pdp/elvaloy-5160-copolymer.1891824z.html#overview>. (Son erişim tarihi: 08 Şubat 2025)
- Arshad, A. K., Shaffie, E., Hashim, W., Ismail, F., & Masri, K. A. (2019). Evaluation of nanosilica modified stone mastic asphalt. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 1508-1516.
- Arslan, F. (2014). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı Gölçük - Kumtaşı ve Karatepe - Bazalt Kullanımının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Aslan, İ. (2020). *Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Doğal Kenevir Lifinin Selülozik Fiber Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

- Aslan, M. (2018). *Mastik Asfalt Üretiminde Pomza, Perlit ve Ahlat Taşı Agregasının Kullanılabilirliği*. (Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Khan, M. Z. H., Milad, A., Yusoff, N. I. M., ... & Mohamed, A. H. B. N. (2022). A systematic review of the utilization of waste materials as aggregate replacement in stone matrix asphalt mixes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35557-35582. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19447-w>
- Blazejowski, K. (2016). *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice*. CRC Press.
- Brown, E., Mallick, R. B., Haddock, J. E., & Bukowski, J. (1997). Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States. Report No: NCAT Report No. 97-1. 32s.
- Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials & Design*, 30(7), 2595-2603.
- Çevrim, K. (2021). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Deniz Kabuğunun Gradasyon ve Katılma Yöntemi Açısından Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Drüschner, L., & Schäfer, V. (2000). Splittmastixasphalt. Deutscher Asphaltverband. https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/DAVBrosch%C3%BCren/Splittmastixasphalt_2023.pdf. (Son erişim tarihi: 22 Ocak 2025)
- Durmaz, A. C. (2024). *Öğütülmüş Karbon Fiber Takviyeli Bitümlü Sıcak Karışımların Performans Özelliklerinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Evirgen, B., Cetin, A., Karşlıoğlu, A., & Tuncan, A. (2021). TMA karışımlarında cam ve polipropilen elyaf kullanımının değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 318-328. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.96165>
- Geçkil, T. (2021). Sıcak karışım asfalt kaplamanın su hasarı direnci üzerindeki RET katkısının etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 537-546. <https://doi.org/10.35234/fumbd.880528>
- Gezer, B. B. (2009). *Mersin İli Çelebili Köyü İçmeler Mevkiinde Yüzeyleyen Kireçtaşlarının Beton ve Asfalt Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Gunka, V., Hidei, V., Sidun, I., Demchuk, Y., Stadnik, V., Shapoval, P., & Bratychak, M. (2023). Wastepaper sludge ash and acid tar as activated filler aggregates for stone mastic asphalt. *Coatings*, 13(7), 1183. <https://doi.org/10.3390/coatings13071183>

- Günaydın, A. (2024). *Atık Kağıt ve Kuşe Harcı ile Beyaz Testliner Üretiminin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Hainin, R., Reshi, W. F., & Niroumand, H. (2012). The importance of stone mastic asphalt in construction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(49), 56-74.
- Harris, B. M., & Stuart, K. D. (1995). Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 64(1), 44-46.
- İskender, E., & Aksoy, A. (2021). Nanokil/Polimer/Bitüm nanokompozit hazırlama yönteminin asfalt karışım performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Teknik Dergisi*, 32(3), 10885-10906.
- İzol, E. (2020). *Taş Mastik Asfalt Yapımında Mineral Filler Olarak Mermer Tozunun Kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- İzol, E., & Sarıışık, A. (2022). Taş mastik asfalt karışımlarda mermer tozu kullanımının dayanıma etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 1-11.
- Kabadayı, E. (2019). *Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Karacasu, M. (2021). *Yol Üstyapı Deney Tasarımları ve Superpave*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kaşak, S. (2007). *Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit'in Uygulanabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- KGM (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü. "Karayolu Teknik Şartnamesi". KGM Yayınları. Ankara.
- Kordi, Z., & Shafabakhsh, G. (2017). Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with nano Fe₂O₃. *Construction and Building Materials*, 134, 530-539.
- Köfteci, S. (2017). Bitümlü sıcak karışımlardan geri dönüşüm yolu ile elde edilen agregaların performanslarının değerlendirilmesi: Deneysel bir çalışma. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 535-545.
- KTŞ (2013). Karayolları Teknik Şartnamesi. (Yol Altyapısı. Sanat Yapıları. Köprü ve Tüneller. Üstyapı ve Çeşitli İşler). KTŞ. Ankara.

- Mawat, H. Q., & Ismael, M. Q. (2020). Assessment of moisture susceptibility for asphalt mixtures modified by carbon fibers. *Civil Engineering Journal*, 6(2), 304-317. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091472>
- McDaniel, R. S. (2015). NCHRP Synthesis 475: Fiber Additives in Asphalt Mixtures. Transportation Research Board of the National Academies. Washington. DC.
- Meral, Ü. (2014). *Ambalaj Atıkları İçerisinde Atık Kâğıtların Türkiye’de Değerlendirilmesi (Erzurum İl Örneği)*. (Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Morova, N. (2013). Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.048>
- Morova, N. (2024). Use of waste phonolite as filler material in flexible asphalt pavements. *Materials Science*, 30(1), 96-105.
- NAPA (2002). National Asphalt Pavement Association (NAPA). Series. Q. I. Designing and Constructing SMA Mixtures-State-of the Practice. <https://il-asphalt.org/files/5114/4890/3754/NAPA-QIP122-DesigningAndConstructingSMAMixtures.pdf> (Son erişim tarihi: 22 Ocak 2025)
- Naser, S. S. M., Seyedi, M., & Al-Busaltan, S. (2023). Enhancing Stone Mastic Asphalt through the Integration of waste paper and Cement Kiln Dust. *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, 1(1), 23-37.
- Ogundipe, O. M. (2016). Marshall stability and flow of lime-modified asphalt concrete. *Transportation Research Procedia*, 14, 685-693. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.333>
- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. Karayolları Genel Müdürlüğü. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü Ankara.
- Öner, J., & Özdaş, F. (2022). Taş mastik asfalt karışımlarında tekstil atığı kullanımının araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 522-533. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1030778>
- Özdaş, F. (2021). *Tekstil Nihai Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (2020). Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 261, 120530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120530>
- Rasekh, M. A., Zengin, D., & Haldenbilen. S. (2022). Taş mastik asfalt kaplamalarda mineral elyaf kullanılabilirliğinin araştırılması. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/120741264/14_ulasirma_kongresi_bild

irileri_kitabi29022024_120_129.pdf?1736503553=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTas_Mastik_Asfalt_Kaplamalarda_Mineral_E.pdf&Expires=1750426684&Signature=eyQ7s2k~asidEv77iJxujX3lMeMK9R6DSqU-iLkjwrkIkHB2J6Emw7o81xToVSGcxIloYe9r92W7QzgOXZnev0dWqYCoVUG3Qv7nRDVNu~eKl6no0Zvm0VptvRRdjMVYaltwB41jLt0uCKaKlCli57ie0WHb8yffPtIGUENzSCA4Q4Zey~Y3z64j97A5N1p4sPrHnwiEt6MihUrsYBg1k2cVCOHFAjqF~VwFERKMyWa9es-9ASzcxWjr8aDg56778IH4PsscW01QBc-K81NN9FuEIYbHsjZ24zjpx5sQ0-oJbJ1mJJpoNPBOaYhRXfbe7CwlbCJNQ3Em3ZBrWkPA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA (Son erişim tarihi: 04 Ocak 2025)

- Rodríguez, W., Rivera, J., Sevillano, M., & Torres, T. (2024). Performance evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures with textile waste fibres. *Construction and Building Materials*, 455, 139125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139125>
- Saedi, S. (2019). *Polimerik Katkılarının (FRP, Viatop premium ve SBS) Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. (Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Sağlık, A., Orhan, F., & Güngör, A. G. (2012). BSK Kaplamalı Yollar İçin Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları. T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara, Türkiye.
- Selman, G. Ş. (2015). *Bor atıklarının Asfalt Kaplamalarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği*. (Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Selman, G. Ş., & Gürer, C. (2016). Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Materials Science*, 22(1), 118-125. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.12596>
- Seloğlu, M. (2015). *Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Pascual-Muñoz, P., & Castro-Fresno, D. (2019). Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. *Construction and Building Materials*, 200, 756-769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171>
- Şanlıer, İ. (2018). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları. Performanslarının Karşılaştırılması ve Maliyet Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Tapkın, S. (1998). *Improved Asphalt Aggregate Mix Properties by Portland Cement Modification*. (Master's Thesis, Civil Engineering Department Middle East Technical University)

- Tapkın, S., Çevik, A., & Uşar, Ü. (2010). Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4660-4670. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.042>
- Terzi, S., Karaşahin, M., Gökova, S., Tahta, M., Morova, N., & Uzun, I. (2013). Asphalt concrete stability estimation from non-destructive test methods with artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 23, 989-997. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1023-1>
- Teymen, A. (2019). Estimation of Los Angeles abrasion resistance of igneous rocks from mechanical aggregate properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 837-846. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1134-0>
- Timori, M. I., & Tığdemir, M. (2022). Asfalt beton kaplamalarında tunçbilek uçucu külünün filler olarak kullanılmasının araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 126-141. <https://doi.org/10.21923/jesd.977598>
- Wang, L., Xie, X., & Shi, C. (2010). Evaluation of mineral fiber impact on hot-mix asphalt performance. https://data.abacus.hr/h-a-d/radovi_s_kongresa/nagoya_japan_2010/90485.pdf (Son erişim tarihi: 12 Şubat 2025)
- Yadykina, V., Tobolenko, S., Trautvain, A., & Zhukova, A. (2015). The influence of stabilizing additives on physical and mechanical properties of stone mastic asphalt concrete. *Procedia Engineering*, 117, 376-381. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.181>
- Yang, Z., Zhang, Y., & Shi, X. (2018). Impact of nanoclay and carbon microfiber in combating the deterioration of asphalt concrete by non-chloride deicers. *Construction and Building Materials*, 160, 514-525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.059>
- Yükü, K., Öztürk, T., & Komut, M. (2021). Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/BitumluBaglayicilarLaboratuvarElKitabi.pdf>. (Son erişim tarihi: 05 Aralık 2024)
- Zakerzadeh, M., Shahbodagh, B., Ng, J., & Khalili, N. (2024). The use of waste tyre rubber in Stone Mastic Asphalt mixtures: A critical review. *Construction and Building Materials*, 418, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135420>

ÖZGEÇMİŞ

