

**T.C.
YOZOK BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMALARDA SELÜLOZİK
FİBER YERİNE VERMİKÜLİT KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

BAYRAM ŞAHİN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR**

Yozgat 2021

**T.C.
YOZOK BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMALARDA SELÜLOZİK
FİBER YERİNE VERMİKÜLİT KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

BAYRAM ŞAHİN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR**

Yozgat 2021

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İMZA

Bayram ŞAHİN

07 /07/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMALARDA SELÜLOZİK FİBER YERİNE VERMİKÜLİT KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

BAYRAM ŞAHİN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YÜKSEL TAŞDEMİR

Üstyapılarda en çok rastlanan bozulmalardan olan tekerlek izi oluşumunu engellemek amacıyla geliştirilen Taş Mastik Asphalt(TMA) kaplamalar, yüksek dane teması, kenetlenme kabiliyeti ve yüksek bitüm oranına sahip yapısıyla ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada TMA kaplamalarında katkı maddesi olarak selülozik fiber yerine vermikülit ilavesinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi ve soyulmaya karşı direncinin araştırılması hedeflenmiştir.

Tasarım parametreleri Marshall yöntemine uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmada vermikülit ve selülozik fiber katkıları içeren koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelere dolaylı çekme testi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre vermikülit içeren koşullandırılmamış numunelerin selülozik fiber içeren koşullandırılmamış numunelere kıyasla dolaylı çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüş ayrıca vermikülit içeren numunelerin tekerlek izi direncinin daha yüksek olabileceği sonucuna varılmıştır. Vermikülit ve selülozik fiber içeren koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme dayanımlarının ise yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan Nicholson soyulma deneyi sonuçlarına göre vermikülit katkısının selülozik fiber katkısına kıyasla soyulmaya karşı dirençli olduğu görülmüştür.

2021, 89 SAYFA

ANAHTAR KELİMELE: Taş Mastik Asphalt, Vermikülit, Schellenberger Süzülme Deneyi, Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi, Nicholson Soyulma Deneyi, AASHTO T 283.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF USABILITY OF THE VERMICULITE INSTEAD OF CELLULOSIC FIBER IN STONE MASTIC ASPHALTS

BAYRAM SAHIN

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL**

DIVISION OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. YUKSEL TASDEMIR

Stone Mastic Asphalt (SMA) pavements, developed to prevent the formation of rutting, which is one of the most common deteriorations in pavements, stand out its high grain contact, high interlocking ability and structure with high bitumen content.

In this study, it is aimed to investigate the effect of adding vermiculite instead of cellulosic fiber as an additive in SMA pavements on the indirect tensile strength and resistance to stripping.

Desing parameters was determined according Marshall test method. In the study, indirect tensile test was applied to conditioned and unconditioned samples containing vermiculite and cellulosic fiber additives. According to test results, it was observed that the indirect tensile strength of the unconditioned samples containing vermiculite was higher than the unconditioned containing cellulosic fiber, and it was concluded that the rutting resistance of the samples containing vermiculite could be higher. It was observed that the indirect tensile strength of the conditioned samples containing vermiculite and cellulosic fiber had approximately the same values. In addition, according to the results of the Nicholson stripping test, it was observed that the vermiculite additive was more resistant to stripping compared to the cellulosic fiber.

2021, 89 PAGES

KEYWORDS: Stone Mastic Asphalt, Vermiculite, Schellenberg Binder Drainage Test, Indirect Tensile Strength Test, Nicholson Stripping Test, AASHTO T 283.

ÖNSÖZ

Her şeyden önce gerek yüksek lisans eğitimim süresince ve gerekse tüm tez çalışmalarımın başından sonuna her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitim süresi boyunca üzerimde emekleri bulunan Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevli değerli hocalarıma, deneysel çalışmalarım boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen İnşaat Yüksek Mühendisi İbrahim ASLAN'a, İnşaat Yüksek Mühendisi Yunus GÜNDÜZ'e, çalışmalarım süresince desteklerinden dolayı Yozgat İl Özel İdaresi Proje ve Yapım İşleri Bürosu'nda çalışan tüm iş arkadaşlarıma ve Büro Yöneticilerimiz İzzet GÖK ve Haşim YÜCEL'e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Büşra Hafize ŞAHİN'e, sevgili kızlarım Ece Naz ŞAHİN ve Ayliz Lina ŞAHİN'e, sevgili babam Bekir ŞAHİN'e, sevgili annem Fatma ŞAHİN'e, sevgili kardeşlerim Emine Tuğba ŞAHİN, Burak ŞAHİN'e ve yardımlarından dolayı Alparslan GENÇASLAN'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	3
2.1. Karayolu Altyapısı.....	3
2.2. Karayolu Üstyapısı	3
2.2.1. Rijit Üstyapı	4
2.2.2. Yarı Rijit Üstyapı	4
2.2.3. Esnek Üstyapı	4
2.2.3.1. Esnek Üstyapı Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	6
2.2.3.2. Esnek Üstyapı Avantajları.....	6
2.2.3.3. Esnek Üstyapı Dezavantajları	7
2.2.3.4. Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar.....	8
2.2.3.4.1. Çatlaklar	9
2.2.3.4.2. Ayırışmalar	11
2.2.3.4.3. Şekil Değişirme	11
2.2.3.4.4. Tekerlek İzi Oluşumu	12
3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	18
3.1. Taş Mastik Asfalt.....	18
3.1.1. Taş Mastik Asfalt Tarihsel Gelişimi	19
3.1.2. Taş Mastik Asfalt Karışımlarının Türkiye’de Kullanımı.....	20
3.1.3. Taş Mastik Asfalt Kullanım Amacı ve Uygulama Alanları.....	22
3.1.4. Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler ve Teknik Özellikleri	22
3.1.4.1. Agrega.....	23
	23

3.1.4.1.1. Kaba Agrega.....	24
3.1.4.1.2. İnce Agrega	24
3.1.4.1.3. Mineral Filler.....	25
3.1.4.2. Bitümlü Bağlayıcı	26
3.1.4.3. Katkı Maddeleri	26
3.1.4.3.1. Fiber.....	27
3.1.5. Taş Mastik Asfalt Özellikleri	28
3.1.6. Taş Mastik Asfalt Tasarım Kriterleri	30
3.1.7. Taş Mastik Asfalt Karışımlarının Üretimi	32
3.1.8. Taş Mastik Asfalt Uygulanması.....	33
3.1.9. Taş Mastik Asfalt Üzerine Uygulanan Deneyler	33
3.1.9.1. Schellenberger Süzülme Deneyi	34
3.1.9.2. Marshall Stabilite Deneyi.....	37
3.1.9.3. Dolaylı Çekme Deneyi.....	37
3.1.9.4. Nicholson Soyulma Deneyi.....	38
3.1.10. Taş Mastik Asfalt Avantajları	39
3.1.11. Taş Mastik Asfalt Dezavantajları.....	40
3.2. Vermikülit.....	41
3.2.1. Başlıca Vermikülit Çeşitleri.....	42
3.2.1.1. Kil Vermikülitler	42
3.2.1.2. Otijenik Vermikülit	43
3.2.1.3. Metamorfik Vermikülit	44
3.2.1.4. Makroskopik Vermikülit.....	44
3.2.2. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Durumu	46
3.2.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Yöntemi	48
3.2.4. Vermikülitin Özellikleri.....	48
3.2.4.1. Fiziksel Özellikleri	50
3.2.4.2. Kimyasal Özellikleri	50
3.2.5. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları	51
3.2.5.1. Vermikülitin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımı	53
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	53
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Deney Sonuçları.....	53
4.1.1. Agrega.....	53

4.1.1.1. Agrega Deney Sonuçları	53
4.1.1.2. Elek Analizi.....	54
4.1.1.3. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi	57
4.1.2. Bitümlü Bağlayıcı	57
4.1.2.1. Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları.....	57
4.1.2.1.1. Geleneksel Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri.....	58
4.1.2.1.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları.....	60
4.1.3. Fiber.....	61
4.1.4. Vermikülit.....	62
4.2. Taş Mastik Asfalt Tasarımı ve Deney Sonuçları	62
4.2.1. Karışım Tasarımı.....	63
4.2.2. Karışımın Teorik Maksimum Özgül Ağırlığının Belirlenmesi.....	65
4.2.3. Fiber Katkılı Tasarım Numuneleri Deney Sonuçları	
4.2.4. Fiber Katkılı Tasarım Numuneleri Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları.....	67
4.3. Vermikülit Kullanılarak Üretilen Numunelerin Deney Sonuçları	68
4.3.1. % 6,6 Bitüm Oranı İçin Schellenberger Süzülme Deney Sonuçları	
4.3.2. Fiber ve Vermikülit Katkılı Numunelerin Schellenberger Deneyi Sonuçlarının Kıyaslanması	69
4.3.3. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Deney Sonuçları.....	
4.3.4. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Schellenberger Deney Sonuçları...	71
4.3.5. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları	72
4.3.6. Selülozik Fiber ve Vermikülit ile Üretilen Karışımların Neme Karşı Hassasiyetlerinin Belirlenmesi (AASHTO T-283 Deneyi)	72
4.3.6.1. AASHTO T 283 Deneyi İçin Numunelerin Hava Boşluğunun Belirlenmesi	73
4.3.6.2. AASHTO T 283 Deney Numunelerinin Hazırlanması	73
4.3.6.3. Koşullandırılmamış Deney Numuneleri Üzerinde Dolaylı Çekme Testinin Uygulanması	74
4.3.6.4. Koşullandırılacak AASHTO T 283 Deney Numunelerinin Doygun Hale Getirilmesi	74

4.3.6.5. Koşullandırılacak Numunelere Donma-Çözünme Döngüsünün Uygulanması	76
4.3.6.6. AASHTO T 283 Deney Numuneleri Üzerinde Dolaylı Çekme Testinin Uygulanması	76
4.3.6.7. AASHTO T 283'e Göre Koşullandırılmış ve Koşullandırılmamış Deney Numunelerinin Dolaylı Çekme Testi Sonuçlarının Kıyaslanması .	78
4.3.7. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları	79
4.3.8. Maliyet Analizi	79
5. SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR	84



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Asfalt karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler.	15
Tablo 3.1. Avrupa ve ABD’de TMA kullanımı.....	20
Tablo 3.2. TMA’da kullanılacak kaba agrega özellikleri.	23
Tablo 3.3. TMA’da ince agrega özellikleri.....	24
Tablo 3.4. Yol kaplamalarında kullanılacak bitümlerin özellikleri	25
Tablo 3.5. Mineral fiber özellikleri.....	27
Tablo 3.6. Selülozik fiber özellikleri.	27
Tablo 3.7. TMA aşınma gradasyon ve tolerans sınırları.....	28
Tablo 3.8. TMA binder gradasyon ve tolerans sınırları.....	29
Tablo 3.9. TMA tasarım kriterleri.....	29
Tablo 3.10. TMA agregaların bazı ülkelere göre sınır değerleri	30
Tablo 3.11. TMA Tip 2 aşınma tabakası şartname değerleri.....	36
Tablo 3.12. Ticari değerleri olan vermikülitlerin kimyasal analizleri	41
Tablo 3.13. Dünyada bulunan mevcut vermikülit rezervleri dağılımı (ton).	44
Tablo 3.14. Dünyada 2004-2008 yılları arasında vermikülit üretimi.	45
Tablo 3.15. 2012-2016 yılları arasında Türkiye’de üretilen vermikülit miktarı (ton).....	46
Tablo 3.16. Vermikülitin tane boyu dağılımına göre sınıflandırılması.....	49
Tablo 3.17. Amerika’da kullanılan saf vermikülitin tane boyu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması	49
Tablo 3.18. Amerika’da kullanılan saf vermikülitin elekten geçen miktarı ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması.....	49
Tablo 3.19. Tipik vermikülitin kimyasal analizi.....	50
Tablo 4.1. TMA aşınma gradasyon ve tolerans sınırları.....	53
Tablo 4.2. Kullanılan agrega özelliklerinin deneysel ve hesapsal sonuçları	57
Tablo 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan geleneksel bitümlü bağlayıcının özellikleri.....	58
Tablo 4.4. Bitüm viskozimetre deney sonucu.....	59
Tablo 4.5. Genleştirilmiş vermikülit tozu tane boyutu dağılımı	62
Tablo 4.6. TMA tasarımı bitüm oranlarına göre deney sonuçları.....	66

Tablo 4.7. Optimum bitüm oranı ile üretilen numunelerin değerleri ve uygunlukları	67
Tablo 4.8. Schellenberger süzülme deneyi sonuçları.....	68
Tablo 4.9. Fiber ve vermikülit katkılı numunelerin % 6,6 bitüm oranı için schellenberger deneyi sonuçları	69
Tablo 4.10. TMA tasarımı bitüm oranlarına göre deney sonuçları.....	70
Tablo 4.11. Optimum bitüm oranı ile üretilen numunelerin değerleri ve uygunlukları	71
Tablo 4.12. % 6,4 Bitüm oranıyla yapılan schellenberger deney sonucu.....	71
Tablo 4.13. Fiber katkılı kuru numunelere uygulanan dolaylı çekme deney sonuçları	74
Tablo 4.14. Vermikülit katkılı kuru numunelere uygulanan dolaylı çekme deney sonuçları.....	74
Tablo 4.15. Vermikülit katkılı numunelerin doygunluk derecesi	75
Tablo 4.16. Fiber katkılı numunelerin doygunluk derecesi	76
Tablo 4.17. Fiber katkılı koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme deney sonuçları	77
Tablo 4.18. Vermikülit katkılı koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme deney sonuçları.....	77
Tablo 4.19. AASHTO T 283'e göre dolaylı çekme testi sonuçları.....	78

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Türkiye’de ulaşım türlerine göre yolcu ve yük taşıma oranları.....	1
Şekil 2.1. Karayolu enkesiti	3
Şekil 2.2. Rijit ve esnek kaplamalarda yük dağılımı.....	5
Şekil 2.3. Tipik Karayolu Esnek Üstyapı Enkesiti.....	6
Şekil 2.4. Yol üstyapısında oluşan yorulma çatlağı(a) ve kenar çatlakları(b).	9
Şekil 2.5. Yol üstyapısında oluşan boyuna çatlaklar(a) ve enine çatlaklar(b).	10
Şekil 2.6. Yol üstyapısında oluşan yansıma çatlaklar(a) ve blok çatlakları(b). ...	10
Şekil 2.7. Yol üstyapısında oluşan termal çatlaklar.	10
Şekil 2.8. Üstyapı da oluşan ayrışma(solda) ve çukur(sağda)	11
Şekil 2.9. Yapısal tekerlek izi	13
Şekil 2.10. Akma tekerlek izi.....	13
Şekil 2.11. Aşınma ve oturma tekerlek izi	14
Şekil 2.12. Tekerlek izi oluşumu ve oluklanma.....	15
Şekil 3.1. Asfalt Betonu(solda) ve TMA(sağda) yapısal farklılıkları	18
Şekil 3.2. TMA karışımının ağır trafik hacminin olduğu alanda kullanımı.....	21
Şekil 3.3. TMA Üretimi	31
Şekil 3.4. Schellenber süzülme deneyi beher görünüşleri	34
Şekil 3.5. Kumpas ile yükseklik ölçümü.....	34
Şekil 3.6. Marshall briketlerinin su banyosundaki görünüşleri	35
Şekil 3.7. Marshall stabilite test cihazı	36
Şekil 3.8. İşlenmemiş ham vermikülit	40
Şekil 3.9. Isıya tabi tutulmuş vermikülit	41
Şekil 3.10. Kil vermikülit.....	42
Şekil 3.11. Metamorfik vermikülitin mikro yapısı	43
Şekil 3.12. Vermikülitin dünyada kullanım alanları	45
Şekil 3.13. Vermikülitin üretim aşamaları.	48
Şekil 3.14. Elekten geçirilmiş ham vermikülit(solda), elekten geçirilmiş genleştirilmiş vermikülit(sağda).....	48
Şekil 4.1. TMA karışımlarında kullanılan agreg granülometri eğrisi	54
Şekil 4.2. Su dolu tepsi içerisinde bekletilen kaba agreg	55

Şekil 4.3. 24 saat suda bekletilen ince agrega.....	56
Şekil 4.4. 25°C Su banyosundaki ince ve filler agrega numuneleri.....	56
Şekil 4.5. Döney viskozimetre deney aleti.....	59
Şekil 4.6. Viskozite – Sıcaklık Grafiği	60
Şekil 4.7. Selülozik fiber peletleri.....	61
Şekil 4.8. Çalışmada kullanılan genleştirilmiş vermikülit tozu	61
Şekil 4.9. Genleştirilmiş vermikülit tozu tane boyutu dağılımı eğrisi	62
Şekil 4.10. Kalıptan çıkarılarak 60 °C suda bekletilen numuneler	63
Şekil 4.11. Maksimum teorik özgül ağırlık hesabında kullanılan parçalara ayrılmış bitümlü karışım	64
Şekil 4.12. Beherde bulunan karışım ve su üzerine vakum uygulanması.....	65
Şekil 4.13. Tasarım numuneleri deney sonuçları grafiği	66
Şekil 4.14. Tasarım numuneleri stabilite ve akma değerleri grafiği	67
Şekil 4.15. Tasarım numuneleri deney sonuçları grafiği	70
Şekil 4.16. Tasarım numuneleri stabilite ve akma değerleri grafiği	72
Şekil 4.17. Petri kabında bulunan numuneler ve soyulmaları.....	79

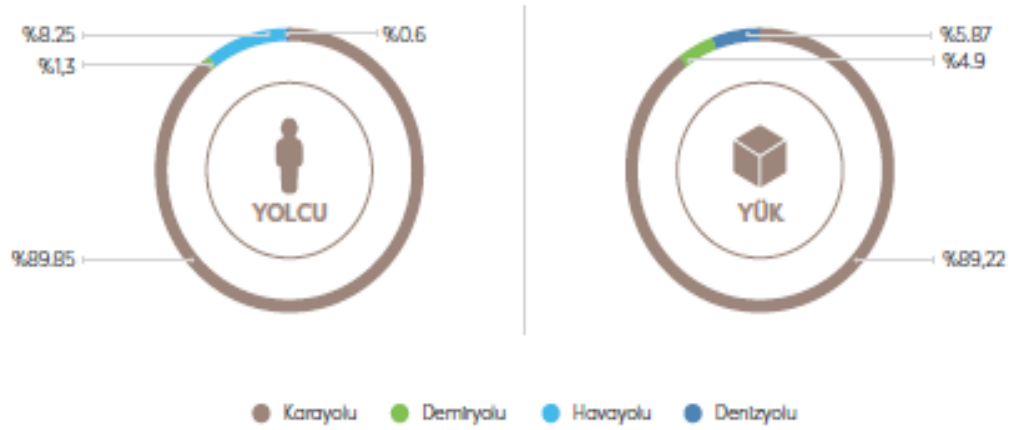
KISALTMALAR LİSTESİ

AASHTO	: Amerikan Eyalet Karayolu Ulaşım Delegeleri Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
cP	: Centipoise
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
Dp	: Hacim Özgöl Ağırlık
Dt	: Teorik Maksimum Özgöl Ağırlık
DYK	: Doygun Yüzey Kurusu
EAPA	: Avrupa Asfalt Kaplama Birliği
İSFALT	: İstanbul Asfalt A.Ş.
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
MTA	: Maden Teknik ve Arama
NAPA	: Amerika Ulusal Asfalt Kaplama Derneği
SMA	: Stone Mastic Asphalt
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
Vf	: Bitüm ile Dolu Boşluk Oranı
Vh	: Hava Boşluğu Oranı
VMA	: Agregalar Arası Boşluk Oranı

1. GİRİŞ

Ulaşım insanların, malların ve hizmetlerin bir amaç için yer değiştirmesidir. Ulaşım bütün tarih boyunca insanlar için en önemli faaliyetlerden birisi olmuştur. Bir ülkede ulaşım faaliyetlerinin gelişmişliği ekonomik gelişim ve değişimlerle bağlantılıdır. Ulaşım, başka ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de doğal ve beşeri coğrafya etmenlerinin tesirinde kalarak gelişmektedir. Ulaşım faaliyetleri karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayolu gibi çeşitli ulaşım sistemleri ile gerçekleşmektedir (Aydın ve Oral, 2019).

Karayolu taşımacılığı XX. yüzyılda ön plana çıkmıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrası hızlı bir şekilde ilerlemiş ve diğer ulaşım yöntemleriyle yarışır hale gelmiştir. 1970’lerde yaşanan enerji kriziyle birlikte azalan karayolu taşımacılığı enerji krizinin aşılmasıyla, 1980’li yıllarda tekrardan artış eğilimini sürdürmüştür ve 2000’li yıllarla birlikte ise birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde daha çok kullanılan ulaşım sistemi haline gelmiştir (Birol vd. 2011). Karayolu, ülkemizde yolcu ile yük taşımacılığında en fazla kullanılan ulaşım sistemidir. Ülkemizde 2019 senesi itibari ile yolcu taşımacılığının % 89.85’i ve yük taşımacılığının % 89,22’i karayolu ile yapılmaktadır (Şekil 1.1) (UAB, 2021).



Şekil 1.1. Türkiye’de ulaşım türlerine göre yolcu ve yük taşıma oranları (UAB, 2021).

Dolayısıyla ülkemizde karayolları ağır trafik yükleri etkisi altında kalmaktadır. Oluşan bu ağır yükler altında üstyapıya tesir eden gerilmelerin artışı, karayolu esnek üstyapısında bozulmaların oluşmasına ve yol servis kabiliyetinin de düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca farklı iklim koşulları altında durabilitelerini koruyamayan malzemelerden dolayı yine yol kullanım ömründe azalmalar meydana gelecektir. Bu tarz durumlarda ulaşımın sürekliliği açısından bakım ve onarım işlemleri yapılması zaruri olacaktır. Böyle durumlarda ise ülke ekonomisine ek bir maliyet oluşacaktır. Bu ek maliyetlere önlem alınması ve yol ömrünün uzatılması amacıyla esnek üstyapının verimini artırmak için katkılar ve teknikler ortaya çıkmıştır (Brown ve Cooley, 1999; Fitzgerald, 2000). Bu ve buna benzer sebeplerle yol üstyapısının maruz kaldığı ve bozulmalara neden olan olumsuz etkilere karşı daha yüksek direnç gösteren taş mastik kaplamalar ülkemizde de son yıllarda daha yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

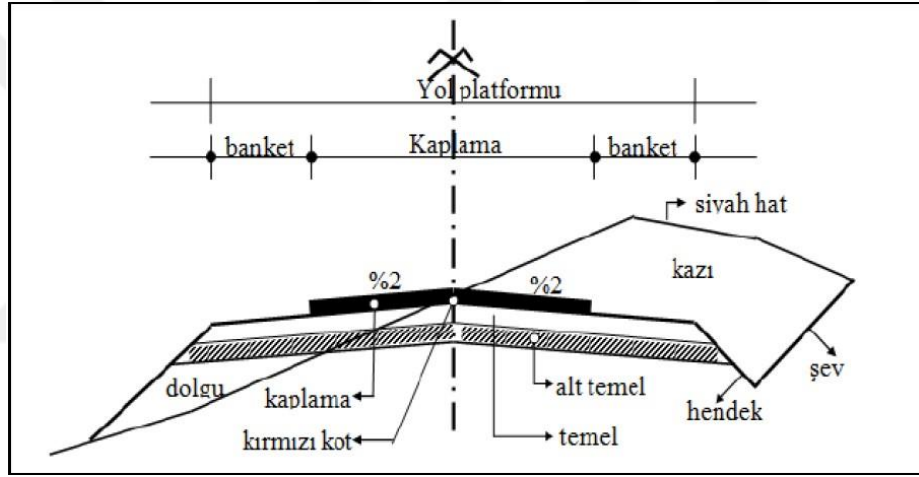
Bu tez çalışmasında, Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarda bitümün agrega yüzeyinden süzülmesini önlemek amacıyla selülozik fiber yerine vermikülitin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca vermikülit ilavesinin, bitümlü karışımın dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi ve soyulmaya karşı direnci incelenmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Karayolu Altyapısı

Karayolu altyapısı, yolun yarma ve dolgu işlerini kapsayan kısımdır. Yolun esas taşıyıcı kısmını oluşturan kesim altyapıdır. Yolun daha uzun süre kullanım ömrü sunmasını sağlayacak nitelikte olması için yapılan menfez, istinat duvarları ile köprü, viyadük ve tünel gibi sanat yapıları da yol altyapısı olarak kabul edilmektedir (Eker, 2019; Yayla, 2011).

Altyapının görevi, üstyapı için düzgün bir yüzey oluşturmak ve üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yayarak taşımaktır (Eker, 2019). Şekil 2.1’de karayolu enkesiti verilmiştir.



Şekil 2.1. Karayolu enkesiti

2.2. Karayolu Üstyapısı

Üstyapı trafik yüklerini altyapıya yayarak ileten tabakalı bir yapıdır. Üstyapı, altyapı üzerine yerleştirilen, alttemel, temel ve kaplamalardan oluşan tabakalı yol yapısıdır. Doğal tabakalardan oluşan altyapı üzerine getirilen ve genelde kırmataş, çakıl, kum, silt, kil gibi malzemelerden oluşturulan tabakaya alttemel tabakası adı verilir. Kaplama ile alttemel arasına yerleştirilen ve trafiğin doğrudan temas etmediği doğal kum, çakıl, silt, kil ve bitüm karışımları gibi malzemelerden oluşan tabaka ise temel tabakası olarak adlandırılır (Eker, 2019).

Üst yapının görevleri; trafik yüklerinden dolayı meydana gelen gerilmeleri üzerine alarak tabakalara aktarmak ve tabana gelebilecek fazla yükü önlemek, düzgün bir yüzey

oluşturarak trafiğin rahatça akmasını sağlamak ve doğanın bozucu tesirine karşı yol gövdesini korumaktır (Sağlık ve Güngör, 2008).

Üstyapılar kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin niteliklerine, türlerine ve yapım yöntemlerine göre;

- Rijit Üstyapı
- Esnek Üstyapı
- Yarı Rijit Üstyapı

olarak 3'e ayrılmaktadır. Ülkemizde esnek üstyapı kullanımı rijit ve yarı rijit üstyapıya göre daha yoğun kullanıldığından esnek üstyapı diğer üstyapı türlerine göre daha detaylı olarak anlatılacaktır (Sağlık ve Güngör, 2008).

2.2.1. Rijit Üstyapı

Rijit üstyapı yüklerin büyük kısmının portland çimentosundan yapılmış beton plaka tarafından taşındığı ve kalan kısmının ise altyapıya aktarıldığı üstyapı tipidir. Yol kaplaması olarak betonun görevi trafik yüklerini tabana iletmek ve bu sırada tabanda oluşabilecek deformasyonu önlemektir. Üstyapı tabanının dayanımına bağlı olarak tabakanın altına temel tabakası yapılıp yapılmayacağına karar kılınır (Orhan, 2006; Sağlık ve Güngör, 2008; Önal ve Kahramangil, 1993).

2.2.2. Yarı Rijit Üstyapı

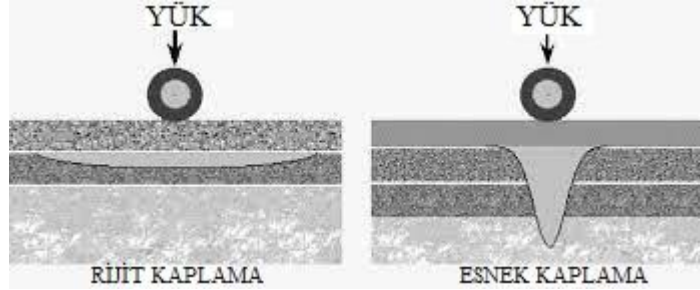
Bitümlü kaplama ve bir yada birden fazla hidrolik bağlayıcı tabaka içeren (çimentodan yapılan) ve yükleri geniş bir yüzeye yayarak tabana aktaran üstyapı tipidir (Orhan, 2006; Sağlık ve Güngör, 2008; Önal ve Kahramangil, 1993).

Karayolu üstyapı seçiminde rijityapı ve yarı rijit üstyapıda kullanılırken TMA kaplamalarda esnek üstyapı kullanılmaktadır.

2.2.3. Esnek Üstyapı

Yüklerin büyük kısmının üstyapıyı oluşturan bitümlü bağlayıcı veya bağlayıcısız tabakalar ile taşındığı kalan kısmının tabana aktarıldığı üstyapı tipidir. Bir esnek üstyapı kaplama tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakalarından oluşur. Esnek üstyapı tesviye sathı ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini kaplama, temel ve alttemel tabakaları

aracılığı ile taban zeminine dağıtır. Stabilitesi agrega kenetlenmesine, tane sürtünmesine dolayısıyla kohezyona bağlıdır (Sağlık ve Güngör, 2008). Şekil 2.2’de rijit ve esnek üstyapıda yük dağılımı gösterilmiştir.

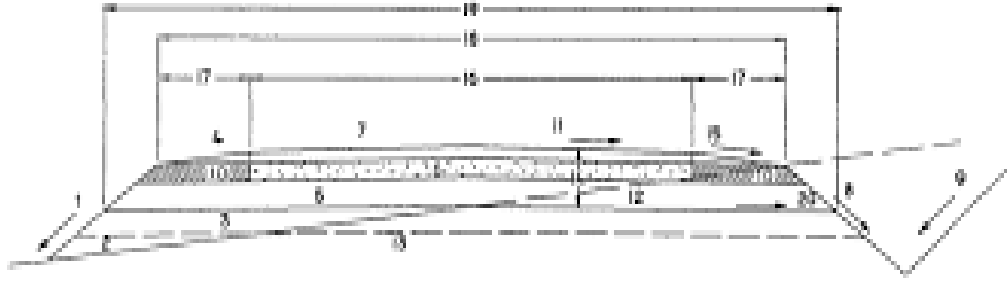


Şekil 2.2. Rijit ve esnek kaplamalarda yük dağılımı

Esnek üstyapılarda en üstteki tabaka kaplama tabakasıdır. Kaplama tabakası aşınma ile binder kısmından oluşur. Bu tabakalar emniyetli ve konforlu bir yüzey oluşturmak için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olmalıdır (Eker, 2019).

Esnek üstyapılarda oluşan gerilmeler, yolun üst tabakasından alta doğru inildikçe düştüğünden kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak tasarlanır. Trafik ve iklim gibi dış faktörlerin doğrudan etkisi altında kalan kaplama tabakası yüksek esneklik modülü ile kaymaya karşı direnç yanında geçirimsizlik özelliğine de sahip olmalıdır (Eker, 2019).

Bitümlü kaplama tabakasının altın kısmında üstyapının oturduğu taban zeminini koruyan temel tabakası bulunmaktadır. Temel tabakası bir ya da birden fazla tabakadan oluşabilmektedir. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitüm bağlayıcıli karışım, stabilize edilmiş granüler malzeme olabilmektedir. Trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılır (Eker, 2019).



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

Şekil 2.3. Tipik Karayolu Esnek Üstyapı Enkesiti

Şekil 2.3’de tipik esnek üstyapı enkesiti ve adlandırmaları verilmiştir.

Esnek kaplamaların en alt tabakası olan alttemel tabakası ise, düşük taşıma gücüne sahip ancak iyi drene olabilen, don kabarmasına, şişme ve büzülme gibi hacim değişikliklerine karşı koyabilen ve kaplamanın taşıma gücünü artıran granüler malzemeden oluşmaktadır (Eker, 2019).

2.2.3.1.Esnek Üstyapı Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Esnek üstyapılar da ana malzeme olarak yükleri karşılayacak agrega ve agregaların birbirine bağlanmasını sağlamak için bitümlü bağlayıcı kullanılır (Dündar, 1998).

2.2.3.2. Esnek Üstyapı Avantajları

Esnek üstyapının genel olarak avantajları aşağıda verilmiştir.

1. Trafik için gürültüsüz ve düzgün bir yüzey oluştururlar.
2. Yüzey aşınması ve dingil yüklerinin doğurduğu deformasyonlara karşı dirençlidir.
3. Kuru olduğu zamanlarda sürtünme katsayısı yüksektir.

4. Stabilité ile rijitlikleri belli bir değere sahip olduğundan yükü alt tabakalara yayarlar.
5. Yüzey de geçirimsizliği sağlarlar.
6. Kademeli inşaat uygundur.
7. Trafik akarken bakım ve onarım yapılabildiği için servis yoluna gereksinme duymazlar.
8. Yapım işlemi tamamlandıktan hemen sonra yol trafiğe açılabilir.
9. Asfalt betonu uygulaması ve bakımı kolaydır. Ancak daha sık bakım gerektirir (Umar ve Ağar, 1991).

2.2.3.3.Esnek Üstyapı Dezavantajları

Esnek üstyapının dezavantajları olarak da bunlar sayılabilir:

1. Bağlayıcı madde olarak kullanılan asfalt, ısıyla yumuşayan (termoplastik) bir maddedir. Sıcaklıkla değişen akışkanlık ve deformasyonlarda bulunur. Bundan dolayı asfalt betonunun plentte hazırlanmasından yola serilmesine kadar ve sıkıştırılması sırasında, sıcaklık derecelerine özenle uymak gerekir. Sıcaklıklarda herhangi bir değişiklik yapılması asfalt kaplamanın kullanım ömrü açısından etkili olacaktır.
2. Asfalt betonunda gerilme – deformasyon bağıntısı yükleme hızı ile sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, bir elastisite modülü ile Poisson oranı yoktur. Üst yapı projelendirme teknikleri genelde elastiklik hipotezine dayanır. Bundan dolayı esnek üst yapıların rijit üstyapılara göre projelendirilmesi daha karışıktır. Yol altyapısı genellikle, fazla yağışın olduğu ilkbahar başlangıcı dönemlerinde kolay deforme olurken; kaplama tabakası ise en sıcak mevsim olan yazın en düşük taşıma gücüne sahiptir. Dolayısıyla, yolun ne zaman en zayıf olacağına karar vermek zordur.
3. Kaplamanın yapımından bir süre sonra bağlayıcı yapısında bulunan uçucu bileşenlerin uçuşması ve okside olmasıyla bitümlü bağlayıcıların yapısı bozulur. Yaşlanma olarak adlandırılan bu olay bağlayıcının sertleşmesine dolayısıyla daha az termoplastik hal göstermesine ve agrega ile yapışmasının azalmasına sebep olur.

Bağlayıcısı yaşlanmış olan kaplama daha gevrek, kolay bozulup dağılacak bir haldedir.

4. Trafik üzerinde bulunan vasıtalardan yol üzerine dökülen petrol ve türevi maddeler bitümlü kaplama ile tepkimeye girerek kimyasal yapısında değişikliğe neden olur. Ayrıca soğuk iklimli bölgelerinde yol yüzeyinde oluşacak buzlanma ve kar birikimini engellemek için uygulanan tuz ve benzeri maddeler ile asfalt kaplama yüzeyinde bozulmalar oluşmaktadır.
5. Esnek üstyapı rengi koyu olduğundan gece görüşü güçtür.
6. Bitümlü kaplamaların yapılacağı zemin kuru ya da nem oranı en fazla %2 olması gerekir. Böyle bir durumda yağışlı bölgelerde bitümlü kaplamaların uygulanma süresini kısılacaktır. Beton kaplamalar ise nemli zeminlerde de uygulanabilir (Umar ve Ağar, 1991).

2.2.3.4. Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar

Esnek yol üstyapısı kullanım ömrü boyunca çeşitli nedenlerde bozulmalara maruz kalır. Bu bozulmalara etken olarak;

- Zeminin yapısı
- İklim Şartları
- Trafik Etkileri
- Yapım ve tasarım hataları
- Yetersiz bakım onarım çalışmaları

sıralanabilir. Bu etkenler sonucu yol üstyapısında bir takım bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmaları;

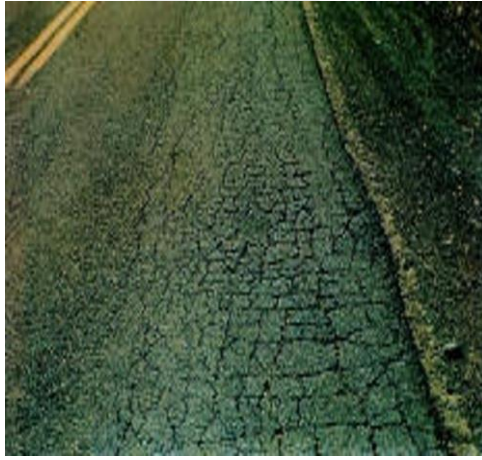
- Çatlaklar
- Ayrışmalar

- Şekil Değiştirme
- Tekerlek İzi Oluşumu

olarak gruplandırabiliriz.

2.2.3.4.1. Çatlaklar

Yol üstyapısında çatlaklar çeşitli durum ve şartlar altında meydana gelmektedir. Çatlakların oluşum sebepleri olarak ağır trafik yükleri, imalat hataları ile iklimsel etkiler örnek gösterilebilir. Dingil yüklerinin kaplama tabakası üzerinde oluşturduğu gerilmelerin, kaplamanın mukavemetini aştığı an çatlamlar kaplama üzerinde oluşmaya başlarlar. Bununla beraber ani hızlanma ve ani yavaşlama durumlarında da ortaya çıkan kuvvetler çatlamlara neden olabilir (Tunç, 2004; Sönmez ve Taştan, 2018). Yol üstyapısında; Şekil 2.4 (a)'da yorulma çatlakları (timsah sırtı çatlamları), Şekil 2.4 (b)'de kenar çatlakları, Şekil 2.5 (a)'de boyuna çatlaklar, Şekil 2.5 (b)'de enine çatlaklar, Şekil 2.6 (a)'de yansıma çatlakları, Şekil 2.6 (b)'de blok çatlaklar ve Şekil 2.7'da termal çatlaklar gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.4. Yol üstyapısında oluşan yorulma çatlakları(a) ve kenar çatlakları(b) (KGM, 2008; Sönmez ve Taştan, 2018).



(a)



(b)

Şekil 2.5. Yol üstyapısında oluşan boyuna çatlaklar(a) ve enine çatlaklar(b) (Sönmez ve Taştan, 2018).



(a)



(b)

Şekil 2.6. Yol üstyapısında oluşan yansıma çatlaklar(a) ve blok çatlakları(b) (Sönmez ve Taştan, 2018).



Şekil 2.7. Yol üstyapısında oluşan termal çatlaklar (Sönmez ve Taştan, 2018).

2.2.3.4.2. Ayrışmalar

Ayrışmalar; agregadan bitümün soyulması, trafiğin aşındırma etkisi ile aşınma tabakasının kalınlığı ile stabilitesinin az olması, yeterli bitüm oranının olmaması, zaman geçtikçe oluşan yaşlanma etkisinden dolayı bitümün sertleşmesi, bitümlü karışım içerisindeki agreganın kille kaplı olmasından ve donma-çözülme olaylarının sık tekrarlaması gibi nedenlerden dolayı segragasyon, sökülme ve soyulma tipi kusurları oluşmaktadır. Bu tip kusurların ilerlemesi de asfalt kaplamasında zamanla çukurların oluşmasına neden olmaktadır (İlcalı vd., 2001). Şekil 2.8' de yol üstyapısında oluşan ayrışma ve çukur gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Üstyapıda oluşan ayrışma(solda) ve çukur(sağda)

2.2.3.4.3. Şekil Değiştirme

Üstyapılarda sıklıkla görülen bozulmalardan biri de şekil değiştirmelerdir. Şekil değiştirmelerde üstyapı ilk başta bulunduğu durumuna ve yüksekliğine göre değişikliğe uğramasıdır. Üstyapıdaki şekil değişikliği tabii zemin, alt temel ve temel tabakaları ile esnek kaplamanın stabilitesinin yetersiz olmasından dolayı oluşabilir (Yamanlar, 2012).

Esnek kaplamada stabilite, karışım içinde bulunan agrega danelerinin birbirleri arasındaki kenetlenmesinden doğan iç sürtünmeden, karışımında bulunan agregayı saran asfalt filminin kohezyonu ve asfalt ile agrega arasındaki adezyondan ve karışımındaki agreganın yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten oluşur (Yamanlar, 2012).

Esnek kaplamanın stabilitesinin yüksek olması, oluşacak toplam deformasyon için geçici deformasyon miktarının yüksek olması, kalıcı deformasyon miktarının düşük olması anlamına gelmektedir. Ayrıca esnek üstyapıda kullanılan bitümün sıcaklık miktarının

yüksekliği bitümün termoplastik özelliklerinden dolayı esnek kaplamanın stabilitesi de düşük olacaktır (Yamanlar, 2012).

Bu ve çeşitli sebeplerle esnek üstyapıda şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Ağır dingil yükleri ve yüksek sıcaklık miktarı sebebiyle üstyapıda en sık görülen şekil değişimi tekerlek izi oluşumudur. Tekerlek izi oluşumuna karşı TMA daha dirençli bir esnek üstyapı kaplamasıdır, bu yüzden tekerlek izi oluşumunu engellemek için TMA kaplamalar daha yoğun kullanılmaktadır.

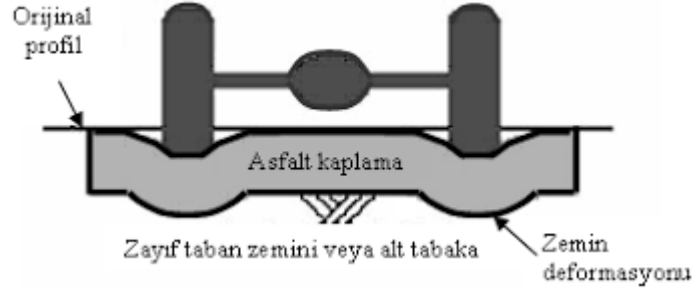
2.2.3.4.4. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izleri, kaplamanın altındaki bir ya da daha fazla tabakada, trafik tesirinin etkisiyle konsolidasyon ile yanal hareketler veya trafik yüklerinin etkisiyle kaplamanın kendisinde oluşan yer değiştirmeler sonucu oluşur (Ilıcalı vd., 2001).

Tekerlek izi oluşumu genellikle, iyi analiz edilmemiş ve sorunlu zemini olan, engebeli araziye sahip, trafik yükleri ve hacmi fazla olan ve iklimsel olarak sıcaklık değeri yüksek olan ülkelerde daha sık görülmektedir. Tekerlek izi oluşması, esnek kaplamalarda sıklıkla görülen ve bozulma türleri arasında çok önemli kabul edilen bozulma türüdür (Umar ve Ağar, 1991).

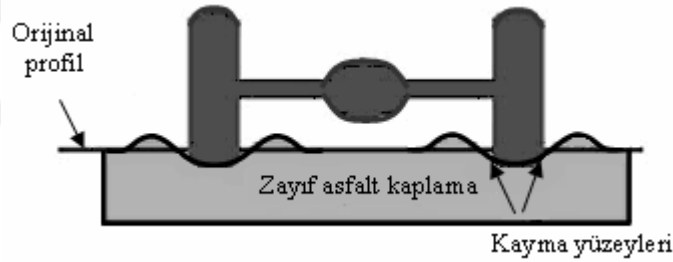
Bitümlü sıcak karışım üzerinde trafik yükü her yüklendiğinde küçük miktarlarda oluşan geri dönüşsüz deformasyonlar toplanarak kalıcı deformasyonlar oluşur. Tekerlek izi oluşumu kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir. Tekerlek izi oluşumunun birçok nedeni olmasına karşın, ana iki sebebi vardır (Umar ve Ağar, 1991).

İlk durumda, asfalt kaplaması altında bulunan temel tabakasına veya alt temele veya tabii zemine çok fazla tekrarlı yük uygulanması tekerlek izi oluşumuna sebep olur. Böyle bir olay kaplama malzemesinin mukavemetinin veya stabilitesinin ne kadar yüksek olmasından çok yapısal bir problemdir. Çünkü uygulanan yüklerin oluşturduğu gerilmeleri kaplama altındaki temel için karşılanabilecek seviyeye indirgeyecek bir kaplama mukavemeti veya kalınlığı mevcut değildir. Asıl deformasyonlar asfalt kaplamasından çok, kaplama altındaki tabakalardan oluşur. Şekil 2.9'da kaplamada yapısal tekerlek izi gösterilmiştir (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 2.9. Yapısal tekerlek izi

İkinci durumda ise; asfalt tabakası içinde meydana gelen deformasyondan dolayı oluşan tekerlek izidir. Bu şekilde olan tekerlek izinde, asfalt karışımlarının tekrarlı ağır yüklere karşı koyacak yeterli kayma mukavemetine sahip olmaması nedeniyle oluşur. Karışımın zayıf olmasıyla her bir ağır taşıtın geçmesiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur ve bu da karışımın aşağı ve kenarlara doğru yer değiştirmesine sebep olarak tekerlek izi oluşumuna neden olur. Şekil 2.10'da Akma tekerlek izi oluşumu gösterilmiştir. Tekerlek izi asfaltın yüzey tabakasında oluşabilir ancak bu yüzeyin altındaki zayıf tabakadan da kaynaklanabilir (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 2.10. Akma tekerlek izi

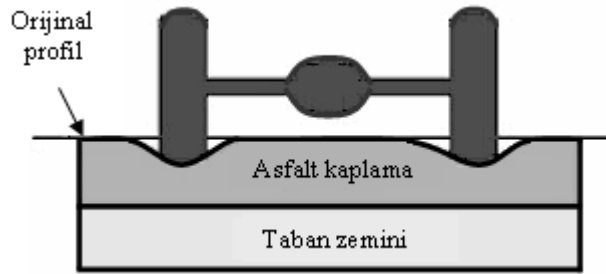
Zayıf asfalt karışımlarında, tekerlek izi genelde yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Tekerlek izi oluşumunu sadece bitümlü bağlayıcının problemi olarak değil, bitümlü bağlayıcı ve mineral agreganın birlikte göz önüne alındığında tekerlek izi oluşumunun belirlenmesi daha doğru olacaktır (Umar ve Ağar, 1991).

Tekerlek izi oluşumu, küçük kalıcı deformasyonların toplamı olduğundan, karışımın kayma mukavemetini arttırmak için, sadece sert bir asfalt kullanmak yeterli değildir, aynı zamanda daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanmaktır. Bu şekilde, karışımındaki asfalt çimentosuna bir yük uygulandığında lastik bir bant gibi davranacak ve uygulanan yük kaldırıldığında ilk şekline geri dönecektir (Umar ve Ağar, 1991).

Asfalt karışımın kayma mukavemetini arttırmanın diğer bir yolu ise, yüksek içsel sürtünme açısına sahip agrega seçimidir. Bu da, parçalar arasındaki teması iyi biçimde

sağlayacak bir granülometriye ve pürüzlü bir yüzeye sahip bir agregaya seçimi ile yapılabilir. Karışıma yük uygulandığında, agreganın parçaları birbirine sıkıca kenetlenir ve sadece tek tek parçaların bir kümesi değil, daha büyük, tek ve elastik bir taş olarak çalışır. Asfalt çimentosunda da olduğu gibi, agreganın lastik bir bant gibi davranacak ve yük kaldırıldığında ilk şekline geri dönecektir. Böylelikle, hiçbir deformasyon birikmesi olmayacaktır (Umar ve Ağar, 1991).

Yüzeysel tekerlek izi tiplerinden olan aşınma tekerlek izi (Şekil 2.11), kısmi çivili tekerleklerin kullanılmasından dolayı, yüzeydeki agregaların aşınması nedeniyle oluşur. Kuzey Avrupa’da çivili tekerlekler kullanıldığı için özellikle bu ülkelerde görülmektedir. Bu tip tekerlek izinde göz önüne alınacak parametre agreganın sertliğidir (Verstraeten, 1995).



Şekil 2.11. Aşınma ve oturma tekerlek izi

Tekerlek izi oluşumu ile yolun enine düzgünlüğü bozulur. Enine düzgünlüğü kabul edilebilir bir sınırdan üzerinde bozulan bir yol, konfor ve güvenlik açısından istenmeyen sorunlar ortaya çıkarır. Bu sorunlar; şerit değiştirme sırasında araç içindeki kişilerin rahatsız olması ve araç kontrolünün zorlaşmasıdır (Kutluhan ve Ağar, 2009). Aynı şekilde tekerlek izi ve oluklanma (Şekil 2.12) nedeniyle asfalt yüzeyinde oluşan su birikintileri, arabada sarsıntı, hâkimiyet kaybı, kayma ve fren mesafesinde kısalma gibi sorunlara neden olabilmektedir. Özellikle kış aylarında yolda, tekerlek izi hasarından dolayı biriken suyun donması, araba hâkimiyeti açısından ciddi problemler doğurur ki buda büyük kazalara sebebiyet verebilir. Gün geçtikçe trafik yoğunluğunun artması, kamyonların yükleme hızlarının büyümesi ve özellikle tekerlek basınçlarının artması, tekerlek izini yolda daha yaygın bir problem haline getirmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).



Şekil 2.12. Tekerlek izi oluşumu ve oluklanma

Tablo 2.1. Asfalt karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler (Kutluhan ve Ağar, 2009).

	Faktör	Faktördeki Değişim	Faktördeki Değişimin Tekerlek İzi Dayanımına Etkisi
Agrega	Yüzey Dokusu	Düzgün → Pürüzlü	Artma
	Gradasyon	Açık → Yoğun	Artma
	Tane Şekli	Yuvarlak → Köşeli	Artma
	Tane Boyutu	Maksimum boyutta artma	Artma
Bağlayıcı	Rijitlik ^a	Artma	Artma
Karışım	Bağlayıcı Oranı	Artma	Azalma
	Boşluk Oranı ^b	Artma	Azalma
	VMA	Artma	Azalma ^c
	Sıkıştırma Yöntemi	_d	_d
Deney Koşulları	Sıcaklık	Artma	Azalma
	Gerilme-Şekil	Lastik değme basıncında	Azalma
	Değiştirme	artma	Azalma
	Yük Tekrarı	Artma	Azalma
	Su	Kuru → Su içerisinde	Karışım suya duyarlı ise azalma

^a Tekerlek izi oluşumunun belirlendiği sıcaklıktaki rijitlik

^b Boşluk oranı %3'ten küçük olduğunda tekerlek izi pontaisyeli artar.

^c %10 gibi çok küçük VMA değerlerinden kaçınılmalıdır.

^d Sıkıştırma yöntemi sistemin yapısını ve tekerlek izi potansiyelini etkileyebilir.

Tablo 2.1’de asfalt karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler, bu faktörlerdeki değişim ve bu değişimlere göre tekerlek izi dayanımına etkisini gösteren tablo gösterilmiştir.

Tekerlek izi oluşum nedenleri olarak aşağıdaki maddeler sıralanmıştır:

1. Bitümlü karışımın stabilitesini yüksek ısı, düşük viskoziteli bağlayıcı ve yüksek bitüm içeriği nedenleri kaybetmeleri sonucu,
2. Bitümlü karışım tabakalarına yeterli sıkıştırılmanın yapılmamasıyla,
3. Aşırı gerilmeler altında kalan üstyapı tabakalarının kalıcı deformasyonlara maruz kalması,
4. Ağır taşıtların tırmanma şeridinde, kavşaklarda ve otobüs durakları vb. yerlerde yavaş hızlarda ilerlemesi, yüksek hava sıcaklığı,
5. Karışım içerisinde yuvarlak ve dere malzemesinin kullanımı,
6. Temel ve alttemelin tabakalarının ağır trafik yükleriyle boşluk suyu basıncının doygunluğa ulaşmasıyla stabilitelerini kaybetmeleri,
7. Yetersiz sıkışma ya da yol tabakasında yetersiz drenaj nedenleriyle üstyapı tabanının stabilitesini kaybetmesi ve taşıma gücünün zayıflaması,
8. Banket malzemesinin stabil olmaması, yeterli yanıl desteği sağlayamaması,
9. Yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı,
10. Banket malzemesinin yeterli yanıl desteği sağlayamaması,
11. Karışımnda bitümlü bağlayıcının yüksek penetrasyonlu olması,
12. Aşırı filler ile aşırı bitüm oranı gibi nedenlerle tekerlek izi oluşur (İlıcılı vd., 2001; Umar ve Ağar, 1991).

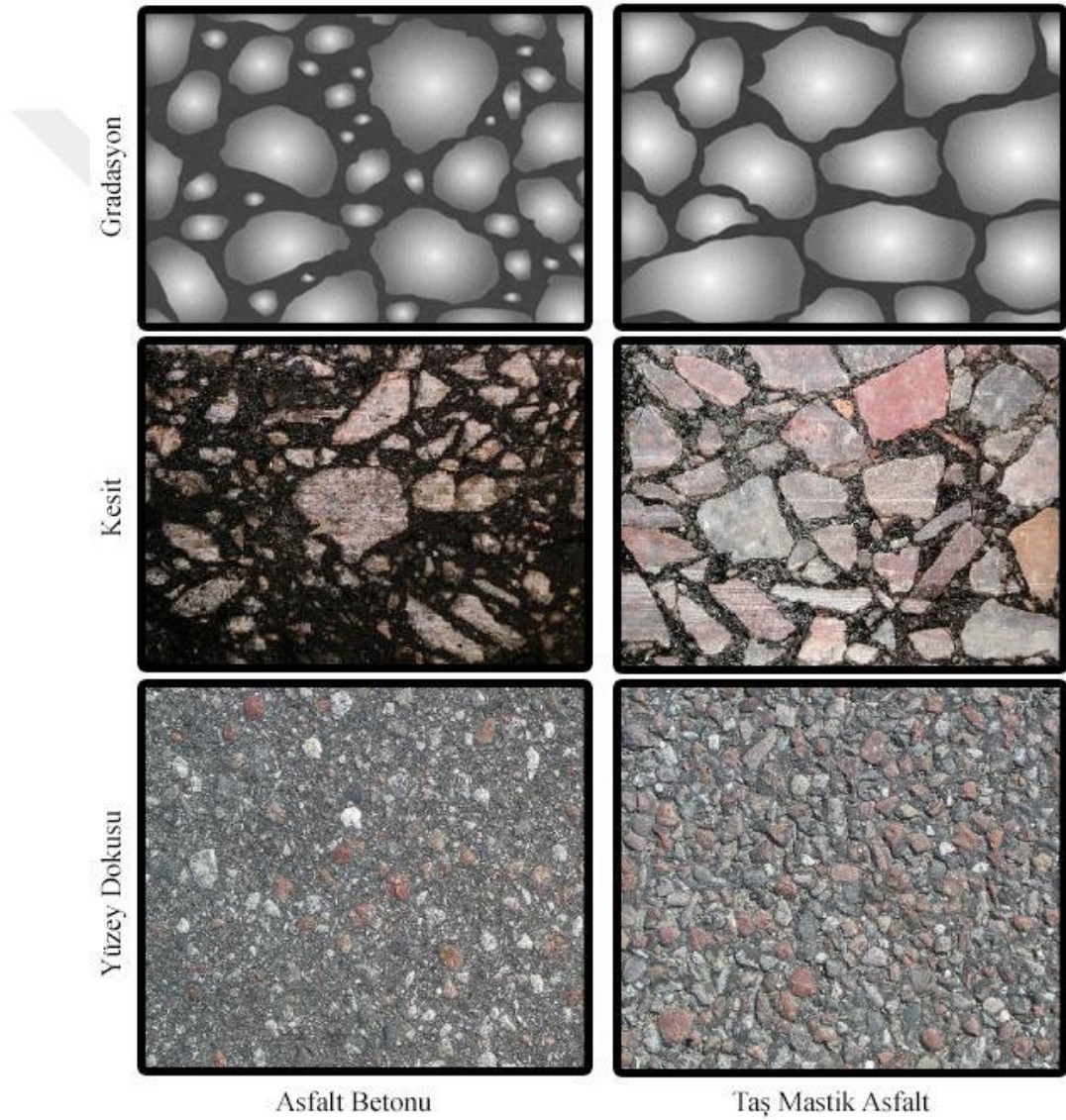
Tekerlek izini azaltmaya yönelik çözüm önerileri aşağıda sıralanmıştır:

1. Tekerlek izi oluşumunda büyük bir etkiye sahip olan ticari taşıtlar, yasal sınırın üzerinde yüklenmemeli, yasal sınır üzerinde yükleme yapılmasına izin verilmemelidir.
2. Taşıtların durma noktasına geldiği, dolayısıyla yükleme sürelerinin fazla olduğu, yavaşlama ve hızlanma nedeniyle teğetsel gerilmelerin olduğu kavşak, kurba, tırmanma şeridi vb. bölgelerde, tekerlek izine dayanımı yüksek karışımlar veya çimento betonu kullanılmalıdır.
3. Kullanılacak agregalar, sert, dayanıklı, keskin köşeli, ayrıtlı (mikro pürüzlülüğü yüksek) ve kırılmış yüzeyli olmalı, yuvarlak taneli, pürüzsüz, kırılmamış ve biçimsiz (yassı) olmamalıdır. Sıcak bölgelerde sert (düşük penetrasyonlu) veya modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır. (Modifiye bitümlerin, ancak uygun agrega granülometrisiyle kullanıldığında, karışımın performansını arttırdığı unutulmamalıdır). Bağlayıcı oranı optimum olmalı, sıkıştırmayı kolaylaştırmak için keyfi olarak bağlayıcı oranı arttırılmamalıdır.
4. Kaplama tabakası gereğinden fazla kalın yapılmamalıdır. Tekerlek izi miktarı, (yaklaşık 10 cm'ye kadar) kalınlıkla birlikte artmaktadır.)
5. Tekerlek izine dayanım yönünden, nominal maksimum agrega tane boyutu ve iri agrega oranı yüksek olan gradasyonlar tercih edilmelidir. Örneğin, nominal maksimum agrega tane boyutu 12.7 mm'den büyük, iri agrega oranı yüksek olan ve modifiye edilmiş TMA karışımının, daha yüksek tekerlek izi performansı sağlayabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu karışım, Fransa'da tercih edilen iki tabakalı sistem içerisinde uygulanabilir. Bu sistemde, üstteki ince tabaka durabilite, geçirimsizlik ve kayma direnci sağlarken, alttaki daha kalın tabaka, tekerlek izine ve yorulma çatlamasına dayanımı sağlamaktadır. Bu sistemde, iri gradasyona sahip TMA karışımı, alttaki tabakayı oluşturmalıdır (Kutluhan ve Açar, 2009).

3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

3.1. Taş Mastik Asfalt

Gerek dünyada gerekse ülkemizde artan trafik hacmi ve dingil yüklerinden dolayı yollarda oluşan tekerlek izleri diğer adıyla oluklanmalar, üstyapıda oluşan en önemli bozulmalardan kabul edilmektedir. Bu yüzden tekerlek izi oluşumunu azaltması ve yolların ömrünü arttırması amacıyla, yüksek dane teması ve kenetlenmeyi sağlayan ve yüksek bitüm oranına sahip taş mastik kaplamalar geliştirilmiştir.



Şekil 3.1. Asfalt Betonu(solda) ve TMA(sağda) yapısal farklılıkları (Temren, 2009)

Taş mastik asfaltlar genellikle ağır taşıt trafiğinin daha yoğun olduğu yollarda tercih edilmektedir. Agrega iskeletinin kaba mıcırdan oluşması nedeniyle agrega parçacıkları

arasında daha fazla boşluk olmasına neden olmaktadır (İSFALT, 2020). Bu boşluklar ise mastik harç denilen ince agrega, filler, bitüm veya modifiye bitüm ile bitümün akmasını engelleyen fiber veya diğer katkı maddeleri ile doldurulmaktadır. TMA karışımlarda bitüm oranı yüksektir. Karışımda bitüm oranının yüksek olmasının karışım için hem iyi hem kötü etkileri olmaktadır. Bitümün fazlalığı karışımın durabilitesi açısından olumlu iken bitümün süzülmesi bakımından da olumsuz etkisi olmaktadır. Bu kuma problemin önüne geçmek için TMA karışımına ek olarak selülozik fiber (elyaf) ilave edilmektedir (Orhan, 2006). Şekil 3.1’ de TMA ve geleneksel BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) yüzey dokuları gösterilmiştir.

3.1.1. Taş Mastik Asfalt Tarihsel Gelişimi

TMA kaplamaları 1968 yılında Almanya ‘da ilk olarak “Splittmastix asphalt” olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen zamanlarda ise İsveç, İsviçre, Fransa ve Hollanda gibi ülkelerde de kullanılmaya başlanmıştır. TMA karışımları, Almanya’da kullanılan çivili karlastiklerden dolayı oluşan plastik deformasyonları engellemek amacıyla geliştirilmiştir. Almanya’da TMA tipi karışımlarının ilk kullanım amacı; kış aylarında sürüş güvenliğini ile konforunu artırmak için kullanılan çivili lastiklerin, asfalt kaplama üzerinde meydana getirdiği aşınma ve tekerlek izi oluşumunu önlemektir. 1975 yılıyla birlikte İskandinav ülkeleri dışında çivili lastik kullanımının yasaklanması ile Almanya’da TMA karışımlarının uygulanmasına bir müddet ara verilmiştir. Ancak zamanla ağır taşıt trafiği ve dingil yüklerinin artması ile birlikte yollarda tekerlek izleri oluşmaya başlamış, bu da zamanla ciddi bir problem olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, Almanya’da yapılan TMA karışımlarının diğer karışımlara göre daha az deformasyon gösterdiği tespit edilmiş ve bu nedenle TMA karışımları yeniden kullanılmaya başlanmıştır. TMA karışımlarının yeniden kullanıma başlamasıyla 1984 yılında TMA teknik şartnamelere girmiştir (Harris, 2009; Scherocman, 1993). ABD ve diğer AB ülkelerinde TMA kullanımına başlama yılları ile hangi yollarda kullanıldığına dair bilgiler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Avrupa ve ABD’de TMA kullanımı (Campbell, 1999).

Ülke	Bilgi
ABD	ABD’de 1991 yılında kullanılmaya başlanmıştır.
Belçika	Yüksek trafik hacminin hakim olduğu birçok alanda yenilenme ihtiyacı olan yollar TMA ile tekrar kaplanıyor.
Danimarka	1982 yılında kullanılmaya başlandı. Yüksek trafik hacmine sahip yollarda, havaalanlarında ve endüstriyel alanlarda kullanılıyor.
İtalya	1991 yılında kullanılmaya başlandı.
İsveç	1974 yılında yapılmış ve 1988 yılından itibaren otoyollar ve ana arterlerde aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır.
Macaristan	1983 yılında kullanılmaya başlanmıştır.
Norveç	1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek trafik hacmine sahip yollarda, havalimanlarında kullanılıyor.

Şu anda TMA kaplamalar, Almanya, Avusturya, Belçika, ABD, Hollanda ve diğer İskandinav ülkelerinde aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri’nde lastik iç basınçlarının artması ve lastik ile kaplama tabakası arasındaki temas alanının azalması sonucunda birim alana gelen yükün artmasıyla tekerlek izi oluşumunun artmasından dolayı taş mastik asfalt kullanımına karar verilmiştir. ABD’de 1991 yılında TMA uygulamalarına başlanmıştır. Olumlu sonuçlar alınmasıyla birlikte TMA kaplamaların yaygın olarak kullanımına devam edilmiştir (Brown vd., 1997).

Asfalt karışımlar üzerinde çalışma yapan Amerikalı bilim adamları Almanya’da kullanılmaya başlanan TMA karışımlarını kalıcı deformasyonlara karşı incelemeye başlamışlardır. İncelemeler sonucu TMA karışımları diğer kaplama türlerine kalıcı deformasyonlarda daha üstün özellik göstermişlerdir (Tayfur, 2001).

3.1.2. Taş Mastik Asfalt Karışımlarının Türkiye’de Kullanımı

Türkiye’de ilk TMA uygulamalarına KGM’nin sorumluluğunda 1998 yılında başlanmış olmakla beraber bu TMA yapılan kesimler 1999 yılından itibaren kullanılmaya başlamıştır. KGM’nin 1999 yılında yaptığı deneme kaplamalar sonucunda TMA’nın olumlu katkıları olduğu görülmüştür. KGM tarafından 1997 yılında Alman TMA şartnamesinden

faydalanarak ülkemiz için ilk TMA şartnamesi yayınlanmıştır. KGM, 2002 yılında Yollar Fenni Şartnamesi'ne yapılan bir ek ile aşınma tabakası ile ilgili şartnameyi revize etmiştir. Bu yıllarda maliyetinin yüksekliği, modifiye bitüm imalatı ve temindeki zorluklar ve yeni birim fiyat analizinde meydana gelen zorluklar, konunun müteahhitler tarafından iyi anlaşılamaması gibi nedenlerle yaygın olarak kullanılamamıştır. Birkaç istisna dışında TMA ilk yıllarında yaygınlaşamamıştır. Türkiye'de ilk TMA uygulanan yol kesimleri, 1999 yılında yapılan Ankara-Polatlı-Sivrihisar yolu ile yine 1999 yılında yapılan Bala-Kulu Devlet Yolu'dur (KGM, 2007; Sönmez, 2009; Güngör, 2009; Tuğlu ve Kazankıran,2004).

Daha sonra KGM dışında İSFALT bu çalışmaları 2003 yılında sürdürmeye devam etmiştir. İlk olarak Küçükçekmece Çobançeşme Kavşağı ve Bakırköy'de Ataköy kavşağı yapılmıştır (2003). 2007 yılında Metrobüs hattı Avcılar-Cevizlibağ kesimi yapılmıştır. 2008 yılında Metrobüs hattı Cevizlibağ-Zincirlikuyu arası ve Vatan Caddesi, Millet Caddesi yapılmıştır. 2009 yılında Metrobüs hattı Zincirlikuyu-Söğütluçeşme arası yapılmıştır. İSFALT tarafında TMA çalışmaları daha sonraki yıllarda da devam etmiştir (Campbell, 1999; Sönmez, 2009).



Şekil 3.2. TMA karışımının ağır trafik hacminin olduğu alanda kullanımı

TMA ülkemizde ağır trafik hacminin olduğu otoyollarda, şehiriçi kavşaklarda ve toplu taşıma araçları için ayrılmış yollarda aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır (Yardım ve Arslan, 2013).

3.1.3. Taş Mastik Asfalt Kullanım Amacı ve Uygulama Alanları

TMA kaplamaların bitüm içeriği bakımından daha yüksek orana sahip olduğundan, geleneksel aşınma tabakalarına kıyasla daha kalın film tabakası oluşur ve dolayısıyla

dayanımı da artmaktadır. TMA'da süzölmeyi engellemek için karışıma katılan stabilizör (selüloz veya mineral fiber), karışım da oluşabilecek segragasyonunu önler ve karışımın daha homojen olmasını sağlar. Aynı şekilde bu stabilizörler yardımıyla karışımda asfalt bağlayıcı kullanımına olanak sağlamaktadır. Böylece stabilitesi ve performansı (sürüş konforu ile emniyeti) açısından daha iyi bir aşınma tabakası üretilebilmektedir. TMA karışımlarında kullanılan agregaların, yüksek oranda kırılmış ve boşluklu gradasyona sahip olmasından dolayı içsel sürtünme direnci artmakta ve tekerlek izi deformasyonlarına karşı daha dirençli olmaktadır. TMA tabakası geleneksel asfalt aşınma tabakalarına kıyasla daha ince olarak yapılabilmesinden dolayı, imal süresi kısa olmakta aynı zamanda daha az bakım-onarım gerektirmektedir. Dolayısı ile TMA tabakası, kalıcı deformasyonlar ile aşınmaya karşı daha dirençlidir. Homojen ve geçirimsiz yapısıyla da yüksek kaliteli aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır (EAPA, 1998; Orhan, 2006; Tunç, 2004).

TMA'nın potansiyel uygulama alanı olarak özellikle trafik kapasitesi yüksek olan havaalanlarında, soğuma ve ısınma etkisi ile yorulma direncinin yüksek olması gerektiği köprü döşemelerinde, ince kaplama tabakası yapılması gerekli yerlerde, çivili lastiklerin kullanıldığı yol yapılarında ve trafik hacminin yoğun olduğu kavşaklar, otoyollarında kullanılmaktadır (Orhan, 2006; Tayfur, 2001).

3.1.4. Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler ve Teknik Özellikleri

TMA karışımlarında kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışımdaki birleşim oranları karışım performansını etkilemektedir. Her ülkenin iklim ve trafik hacmine göre etkenleri göz önüne alarak oluşturdukları şartnamelerinde kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinde farklılık olabilir ancak genel olarak içeriğinde daha sağlam ve dayanımlı malzemeler kullanılmalıdır (Tayfur, 2001). Ülkemizde TMA karışımlarında kullanılacak olan agrega, bitüm ve fiber katkıları Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen özelliklere sahip olmalıdır.

3.1.4.1. Agrega

TMA karışımlarda agregalar arası temas geleneksel asfalt betonu kaplamalara göre daha fazla olduğundan TMA karışımlarda kullanılacak olan agreganın geleneksel asfalt betonu kaplamalarda kullanılacak olan agregadan daha üstün nitelikli olması gerekmektedir (Akpolat, 2014).

3.1.4.1.1. Kaba Agrega

TMA’da kaba agrega granit ve bazalt gibi kayaçlar ile diğer yüksek kaliteli kayaçların kırılmasıyla elde edilen agregalardan oluşmaktadır. Kaba agrega çakıldan üretilmek istendiğinde ise, çakılın tüm yüzeylerinin kırılarak pürüzlü yüzeyin elde edilmesi gerekmektedir (Akpolat, 2014). Kaba agrega No.4 elek üzerinde kalan malzeme; kırmataş, kırma çakıl veya bunların birleşiminden oluşmaktadır (KTŞ, 2013). TMA kaplamalarda kullanılacak olan kaba agrega özellikleri Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)’ne göre Tablo 3.2.’de belirtilen özellikleri sağlamalıdır.

Tablo 3.2. TMA’da kullanılacak kaba agrega özellikleri (KTŞ, 2013).

Deney	Şartname limitleri***	Deney standardı
Parçalanma Direnci Kaybı(Los Angeles), %	≤ 25	TS EN 1097-2* AASHTO T 96
Aşınma Direnci Kaybı (Micro-Deval)** , %	≤ 20	
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	≤ 14	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS-812
	≤ 20 (FI20)	TS EN 933-3*
Cilalanma Değeri, %	≥ 50 (PSV50) ≥ 40 (PSV40) binder için	TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti, % (24 saat 60° suda bekletmeden sonra)	≥ 60	KTŞ Kısım 403 EK-A
Su Emme, %	$\leq 2,0$ (WA24 2)	TS EN 1097-6
Kil Toprakları ve Ufanabilir Daneler, maksimum %	Bulunmayacak	TS-3526 (ASTM C-142)
*Referans metot, **Gerek görüldüğünde yapılacaktır. ***Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043’deki sınıfını gösterir.		

TMA karışımlarında bulunan direnç kaba agrega oranının fazlalığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaba agreganın dirence olan katkısı göz ardı edilmemelidir.

3.1.4.1.2. İnce Agrega

İnce agrega, sert ve dayanıklı kırmataş ile kırma çakıl ya da bunların birleşiminde oluşan No.4 elekten geçen malzemedir. Kil toprakları, gevrek malzemeler, ile organik ve

diğer zararlı malzemeler ince agrega olarak kullanılmamalıdır (KTŞ, 2013). İnce agrega KTŞ'ye göre Tablo 3.3. de belirtilen özelliklerde olmalıdır.

Tablo 3.3. TMA'da ince agrega özellikleri (KTŞ, 2013).

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 (WA24 2)	TS EN 1097-6
Metin Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 1,5 (MB1,5) ≤ 3,0 (MB3,0)*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 3,0 (MB3,0)*	
*Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.			

3.1.4.1.3. Mineral Filler

No.200 elekten geçen malzeme filler olarak isimlendirilir. Karışımlarda mineral filler taş tozu ve sönmüş kireçten oluşacaktır. Mineral filler tamamen kuru olmalı toprak, kil, organik madde ve diğer zararlı maddeleri içermemelidir (KTŞ, 2013).

TMA ile yoğun gradasyona sahip olan karışımlar karşılaştırıldığında TMA karışımlarında mineral filler gereksinimi daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni ise TMA karışımları kesikli bir gradasyona sahip olmasıdır. TMA karışımlarında bağlayıcı içerisinde kalan mineral diller miktarı büyük orandadır. Buna ek olarak kalan kısım ise yük taşıyan agrega iskeletinde bulunur (Saedi, 2019).

Filler olarak diğer malzeme çeşitlerinden portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül olabilmektedir (Saedi, 2019).

3.1.4.2. Bitümlü Bağlayıcı

Bitüm, KGM'ye göre doğal asfalt şeklinde bulunabilen veya ham petrol rafine edilerek elde edilebilen, hemen hemen veya tam olarak toluen de çözülebilen bir malzemedir. Ayrıca ortam sıcaklığında katıya yakın olan veya oldukça viskoz olan, görünürde buharlaşmadığı ve yapışkan olup su geçirmediği belirlenen malzemedir (KGM, 2000).

Bitümlü bağlayıcı asfalt içerisinde bulunan malzemelerin birbirine bağlanmasını sağlayarak karışımın bir bütün olarak yapısal dayanıklılığını artırır. Ancak bitüm şartnamelerde belirtilen değerlere ve aralıklara sahip değilse bu sefer yağlayıcı olarak görev yapar ve yolların bozulmasına sebep olacaktır.

TMA karışımlarında genelde düşük penetrasyona sahip bitümlü bağlayıcılar kullanılmaktadır. TMA karışımlarında kullanılacak olan bitümlü bağlayıcı TS EN 12591 Bitümlü bağlayıcı standardına uygun 40/60 penetrasyonlu ya da 50/70 penetrasyonlu bitüm olabilir (KTŞ, 2013). Ayrıca bitüme katılan çeşitli katkı maddeleri ile bitümlü bağlayıcı modifiye edilebilir. TMA karışımlarında yüksek oranda bulunan bitümün akmasını engellemek için karışıma % 0,3 oranında fiber eklenmesi gerekmektedir.

Tablo 3.4. Yol kaplamalarında kullanılacak bitümlerin özellikleri

Sıra No	Deney Adı	Deney Standardı	Bitüm Sınıfları				
			B 40/60	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B 160/220
1	Penetrasyon, (25 °C) 0,1 mm	TS EN 1426	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
2	Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
3	Frass Kırılma Noktası ^a (°C)	TS EN 12593	≤ -7	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15
4	Yaşlanmaya Karşı Dayanım ^b	TS EN 12607-1					
4.1	Kütle Değişimi(%)		≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
4.2	Kalıcı Penetrasyon (%)	TS EN 1426	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
4.3	Yumuşama Noktası Yükselmesi (°C)	TS EN 1427	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
5	Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230
6	Çözünürlük (%)	TS EN 12592	≥ 99	≥ 99	≥ 99	≥ 99	≥ 99
7	Parafin Mumu İçeriği ^c (%)	TS EN 12606-1	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2
		TS EN 12606-2	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5

^a Soğuk bölgelerde kullanılacak bitümlerde yapılacaktır.

^b Kalite kontrol amaçlı olarak bu deneyin TS EN 12607-2 (TFOT) deney standardı kullanılabilir.

^c Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

Yol kaplamalarında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin geleneksel özellikleri ve deney standartları ile TMA’da kullanılan bitümlü bağlayıcılarında özellikleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

3.1.4.3.Katkı Maddeleri

TS EN 13108-5'e göre, katkı, karışımın mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini veya rengini etkileyen inorganik veya organik lifler veya polimerler gibi karışıma az miktarlarda ilâve edilebilen bileşen malzemedir (EN 13108-5, 2006).

3.1.4.3.1. Fiber

Asfalt karışımlarda fiber olarak önceleri saman kullanımının ilk örnekleri eski Mısırda'daki yapılarda olduğu öne sürülmektedir. Birleşik devletlerde 1920'li yıllarda asbestos fiberleri kullanılmış ve bu 1960'lara kadar devam etmiştir. Kullanılan fiberin asbest fiberi olması ve bunun sağlığa olumsuz zararlar oluşturması ile bu fiber tipinin kullanımı son bulmuştur. 1930'larda pamuk lifleri kullanılmış, fakat zamanla bozulma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Daha sonraları selülozik fiber adı verilen bir fiber tipi kullanılmış ve aynı etki ortaya konulmuştur. Zamanla bahsedilen selülozik fiberlerin oldukça iyi derecere asfaltı taşıdığı anlaşılmıştır (Busching vd., 1970; Button ve Epps, 1981; Freeman vd., 1989; Hamburg, 1985; Serfass ve Samanos, 1996; Peltonan, 1991).

TMA karışımlarda bitüm oranı %6-7 civarında olduğundan ve sıcaklığı 160-170 °C gibi yüksek sıcaklıklara çıkmasından dolayı agregalar arasında bulunan bitüm akmaya başlamaktadır. Bitümün akması ise asfalt kaplamalarında istenmeyen bir sonuçtur. Bitümün akmasıyla kaplamanın iç dayanımında bir azalma oluşmaktadır. Zamanla bu azalmayla tabakanın yaşlanmaya karşı direncini azaltmaktadır. Bu nedenle bitümün agregadan ayrılarak akmasını engellemek amacıyla TMA kaplamalarında fiber kullanılmaktadır (Hamburg, 1985). Selülozik fiber, pürüzlü ve üç boyutlu yapısı sebebiyle iyi bir asfalt taşıyıcıdır. Ayrıca bitümün viskozitesini arttırdığından, yüksek sıcaklıklarda karışımın deformasyonlara karşı direncini de artırmaktadır.

Asfaltın genellikle basınçta güçlü çekmede zayıf olduğu saptanmıştır. Çekme mukavemeti yüksek fiber kullanımı karışımın çekme mukavemetinin artmasına katkı sağlamaktadır. Teoride güçlü fiberler gerilmeleri üzerine alarak nispeten zayıf asfalt üzerinde ki gerilmeyi azaltmayı amaçlamaktadır. Gerilmeleri etkili bir şekilde dağıtmak için fiber ve asfalt karışımı arasındaki adezyon iyi olmalıdır. Fiberlerdeki daha büyük yüzey alanı bu adezyona yardım edebilmektedir. Buna ek olarak, gerilim yoğunluğundan kaçınmak amacıyla fiberler karışım içerisinde uniform olarak dağılmış olmalıdır (Busching vd., 1970). Uniform olarak dağılmayan fiberler bitümün akmasına sebep olacaktır.

TMA karışımlar için fiberler özel olarak üretilmektedir ve genel olarak kullanım oranları %0.3-%0.9'dur. KGM şartnamesinde selülozik ve mineral fiber özellikleri Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'daki gibidir.

Tablo 3.5. Mineral fiber 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.)

Tablo 3.6. Selülozik fiber özellikleri (KTŞ, 2013).

Kül Muhtevası	% 18,0 ± %5,0
PH	% 7,5 ± %1,0
Yağ Absorbsiyonu	Fiber Ağırlığının 5 ± 1 katı
Nem Absorbsiyonu	Ağırlıkça % 5,0

Fiberin avantajları:

1. Çatlama direncinde artışı sağlamaktadır.
2. Asfalt karışımlarında bitümün süzülmesini engellemektedir.
3. Yansıma çatlaklarını azaltma etkisine sahiptir.
4. Paket olarak üretildiğinde toz oluşturmaz ve toz oranındaki düşüklük sebebiyle daha fazla fiber içerir.
5. Mekanik stabiliteyi artırıcı etkisi vardır (İzol, 2020).

3.1.5. Taş Mastik Asfalt Özellikleri

Taş mastik asfalt karışımlarda %70 - %80 oranında kaba agrega ve %6 - %7 oranında bitümlü bağlayıcı içerdiğinden agregalar arasında daha fazla temas olduğundan dolayı bu karışımda kullanılan agreganın, yoğun gradasyonlu geleneksel asfalt betonu kaplamada kullanılan agregadan daha üstün nitelikli olması gerekmektedir. Kaba agreganın yüksek oranda kullanılması agregaların birbiri ile temas halinde bir iskelet yapısı oluşmasını sağlar. Bu iskelet yapısı da yol yüzeyine uygulanan yükleri yoz yüzeyi üzerinde deformasyon olmadan yol alt yapısına iletilmesini sağlar (Atmaca ve Çorbacıoğlu, 1998). Filler/bitüm oranı yoğun gradasyonlu karışımlar için 1,2 iken , TMA karışımlarında bu oran 1,5 olmaktadır (Harris, 2009).

3.1.6. Taş Mastik Asfalt Tasarım Kriterleri

TMA karışımlarında direncin yüksek olması kaba agreganın oranının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaba agreganın dirence olan katkısı göz ardı edilememelidir. No 4 elekten geçen agrega %25-40, No 10 elekten geçen agrega %20-30 ve No 200 elekten geçen kısım için de %8-12 oranları yaygın bir biçimde kullanılan (KTŞ, 2013).

Bunun yanı sıra ülkemizde TMA aşınma ve binder karışımlar için Tablo 3.7. ve Tablo 3.8.' de verilen elek analizi ile tolerans limitleri sonucu görülmektedir.

Tablo 3.7. TMA aşınma gradasyon ve tolerans sınırları (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		TMA TİP-1	TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B	
inch	mm	Geçen %	Geçen %	%
$\frac{3}{4}$	19,0	100	100	4
$\frac{1}{2}$	12,5	90-100	90-100	4
$\frac{3}{8}$	9,5	50-75	50-67	3
No. 4	4,75	25-40	25-35	3
No. 10	2,00	20-30	20-30	3
No. 40	0,42	12-22	12-22	3
No. 80	0,177	9-17	9-17	3
No. 200	0,075	8-12	8-12	2

Tablo 3.8. TMA binder gradasyon ve tolerans sınırları (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
inch	mm	Geçen %	%
1	25	100	
$\frac{3}{4}$	19,0	92-100	4
$\frac{1}{2}$	12,5	73-83	4
$\frac{3}{8}$	9,5	56-66	3
No 4	4,75	32-42	3
No 10	2,00	25-30	3
No 40	0,42	14-20	3
No 80	0,177	9-15	3
No 200	0,075	7-11	2

TMA üretiminde bitüm olarak polimerler ile modifiye edilmiş bitüm kullanılabilir. Bitümün mofiyesi rafineri ile özel istasyon ya da plentte yapılabilir. Bitümün modifiye sonrası viskozimetresi yükselecektir. Bu yüzden özel depolama teknikleri uygulanması gerekir. Modifiye edilen bitüm depolaması yapıldıktan sonra bekleme süresinden fazla bekletilmemeli bu yüzden kullanılacak miktarda bitüm modifiye edilip hemen kullanılmalıdır (Temren, 2009). Tablo 3.9’da KTŞ’ye göre TMA tasarım kriterleri verilmiştir.

Tablo 3.9. TMA tasarım kriterleri (KTŞ, 2013).

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standartları
		Aşınma	Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, %		2-4	3-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim bölgelerin 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 oranı, min (%)		80	80	AASHTO T 283
İndirekt çekme mukavemeti oranı, min (%)		70	70	AASHTO M 325
Tekerlek izinde oturma * (30.000 devirde, 60° de), (%), maks.		6	6	TS EN 12697-22
Fiber 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 tasarımında kullanılan kaba ve ince agreganın oranı birçok ülkede benzerlik göstermektedir. Şartnamelerdeki oranlar arasında dikkate değer bir farklılık görülmemektedir. Şartnamelere genel olarak kaba ve ince agreganın kırılmışlık oranının %100 olması istenmektedir. Oran olarak ise ince agregaların düşük olduğu görülmektedir (Tayfur, 2001). Bazı ülkelerin TMA kaplamaları için gerekli olan agrega değerleri kıyaslamalı olarak Tablo 3.10’ da görülmektedir.

Tablo 3.10. TMA agregaların bazı ülkelere göre sınır değerleri (Altan, 2018)

Cinsi	Özellikler	KGM	Amerika *FHWA	İngiltere	Çek Cumhuriyeti Portekiz
Kaba Agrega	Kırılmışlık Oranı, min.	100	100	100	100
	Los Angeles Aşınma, maks. %	25	30		20
	Na ₂ SO ₄ Sağlamlık Deneyi, maks. %	8	15		
	Cırlanma Değeri, min. %	50	-	55	55
	Su Absorbsiyonu	2,5	2,0		
	Yassılık İndeksi, maks %	25		30	
	%10 İncelik Değeri, min. %			180	
İnce Agrega	Kırılmışlık Oranı, min		100	50	
	Na ₂ SO ₄ Sağlamlık Deneyi, maks. %		15		
	Likit Limit, maks. %		25		

Cırlanma değeri açısından değerlendirilirse hizmet ömrünün yüksek olması taşların cırlanmaya karşı direncinin fazla olmasına da bağlıdır (Tayfur, 2001). Birçok ülkede cırlanma değerinin %55’den büyük olması istenmektedir.

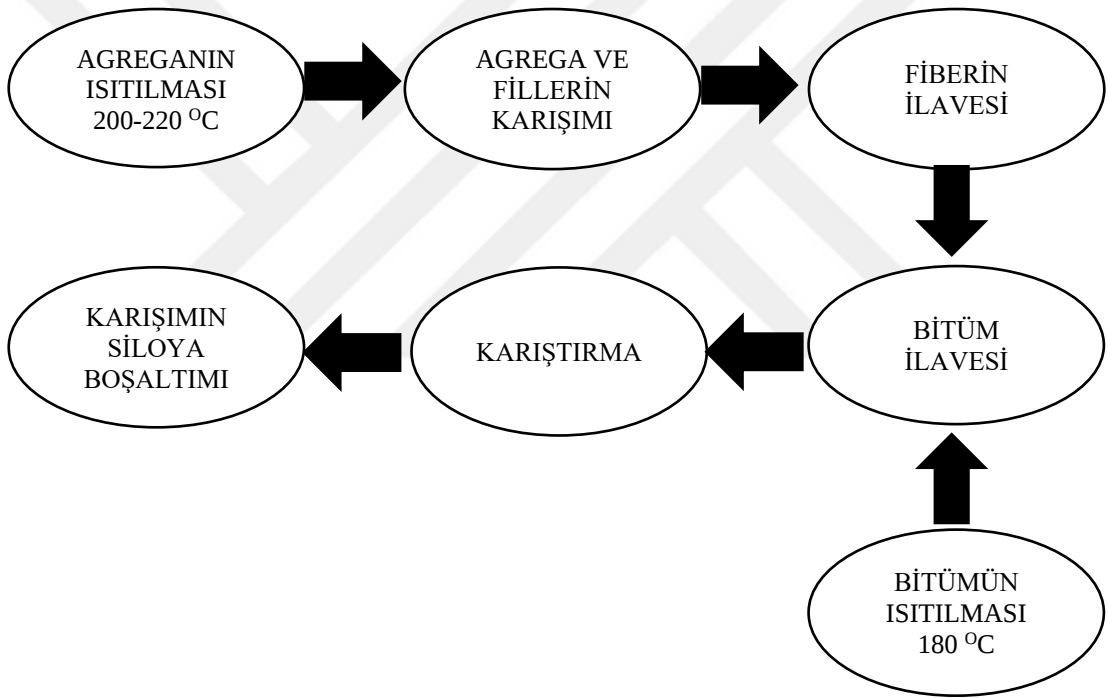
3.1.7. Taş Mastik Asfalt Karışımlarının Üretimi

TMA karışımlar da bitümlü sıcak karışımlar gibi plantlerde yapılmakta ve finişerler yardımıyla serilmektedir. Ancak TMA üretim ve serim aşamasında özel ilgi gerektirir (EAPA, 1998).

TMA karışımında kullanılacak olan agrega şartnamesinde bulunan malzeme özelliklerine göre kırılır ve elek analizleri uygulanarak istenilen gradasyonda agrega oranı belirlenir. Kullanılacak olan agrega bitüm ve karışıma ait deneyler yapılır. Karışım formülüne ve sınır değerlere uygun olarak karışımın plantte üretilmesine geçilir. Günümüzde kullanımda olan 3 tip asfalt plenti mevcuttur. Bunlar;

- Harman tipi karışım
- Sürekli tip karışım
- Kazan tipi karışım

olup en hassas ve en iyi sonucu harman tipi plantlerden sağlanır. Yüksek standartlı yol ve otoyol yapımında kullanılacak karışımların yapımında harman tipi plantler kullanılmaktadır (Tunç, 2001). Ayrıca dibe ve diğer katkı malzemeleri ile filler ilavelerinden dolayı hassas tartım yapabilen harman tipi plantler kullanılmaktadır. Harman tipi plantlerde TMA karışımı yapımı BSK yapımı ile benzerlik göstermektedir. TMA üretimi aşağıda Şekil 3.1.'de belirtilen sıraya göre yapılır.



Şekil 3.3. TMA Üretimi

Eğer TMA karışımlara polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcı kullanılacaksa, bitümlü bağlayıcı ve polimer önceden karıştırılmalıdır. Karıştırılarak modifiye edilen bitümlü bağlayıcı, kesikli ya da sürekli karışım tesisinin karıştırıcısına eklenir. Eğer polimer parçacıklar halinde ise, malzeme kesikli karışım tesisinde tartıya ya da karıştırıcıya, sürekli karışım tesisinde geri dönüşümlü asfalt sisteminden karıştırıcı kısmına katılır. Polimer ister parçacıklar halinde, ister önceden harmanlanmış olsun malzemesi kullanımında, ister önceden harmanlanmış ister parçacıklar halinde katılmış olsun, polimer kullanımında sürekli

ya da kesikli karışım tesisi işlemlerinin karışım süresinde değişim olmaz (Scherocman, 1992).

TMA karışımları uzun zaman silolarda depolanmaz. Bekletilen karışımın bekleme süresinin artmasıyla agregadan malzemenin akması beklenmektedir. TMA karışımlarının taşıyıcı vasıtaya yapışmasının engellemek için, büyük miktarda ayırıcı katkı maddesi kullanılmaktadır (Scherocman, 1992).

TMA karışımlarında karıştırma süresi, geleneksel asfalt karışımlarına göre katkı malzemelerinin daha iyi karışması için daha uzun sürmektedir.

TMA karışımlarında, mineral filler ilavesi, üretimde en önemli sorundur. Harman tipi plantlerde, mineral filler ayrıca tartılarak, agrega ile beraber miksera gönderildiğinden, sürekli tip plantlere göre filler ilavesi daha kontrollü ve hassastır. Genellikle agregalardan gelen filler, gereksinimi karşılamaz ve dışarıdan filler ilavesi gerekmektedir. Bunun için filler silosu ve hassas tartı sistemine ihtiyaç duyulmaktadır (Tayfur, 2001).

TMA karışımlarda katkı malzemelerinin doğrudan karışıma ilavesi de ayrıca önemli olup; katkı malzeme ilavesi için plantlerde hava veya ağırlık sistemine göre çalışan düzeneklerin olması gerekmektedir (Tayfur, 2001).

3.1.8. Taş Mastik Asfalt Uygulanması

TMA karışımlarda serme işlemi bitümlü karışımların serme işlemiyle aynıdır. TMA'da kullanılan bağlayıcı yüksek viskoziteli ve çoğunlukla modifiye bağlayıcı olduğundan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da geleneksel asfalt betonu kaplamalardan fazla olmaktadır. Silindirme ve sıkıştırma süreci sericiden hemen sonra başlamalıdır ve hemen arkasından devam etmelidir (Han vd., 2009).

TMA karışımları katkı malzemesi kullanılarak üretildiğinden serim yerinde çabuk soğur bu neden sıkıştırma işlemi hızlıca yapılmalıdır. KGM teknik şartnamesine göre karışım hazırlanarak sericiye verildiğinde ki sıcaklık 145 °C'nin altında olmamalıdır. Silindirme işlemi, serilen karışım malzemesinin sıcaklığı 115 °C'ye düşmeden tamamlanmalıdır. Serim işlemi için minimum hava sıcaklığı 10 °C olarak verilmiştir. Yine KGM şartnamesine göre statik ağırlığı 10 ton olan en az iki adet çelik bandajlı silindirler yardımıyla sıkıştırma yapılacaktır. Sıkıştırma anında vibrasyon uygulanmayacaktır.

Silindirlerde, karışımın bandajlara yapışmasını engellemek için, sulama sistemi olacaktır (KTŞ, 2013).

Sıkıştırma işleminde istenilen yoğunluk 6-8 geçişle elde edilebilmektedir. TMA karışımların sıkıştırılma işleminde, bitümlü bağlayıcının kalın film tabakası oluşturduğu ve bu yüzden malzemenin kusmasına neden olacağından lastik silindirler kullanılmamalıdır (Scherocman, 1992).

TMA karışımlar, diğer sıcak karışımlara göre daha yüksek yoğunluklara sahip olduğundan sıkıştırmadan önce ve sıkıştırma sonrası kalınlıkları arasındaki fark çok fazla olmamaktadır. Diğer sıcak karışımlarda ise bu kalınlık farkı yarısı kadardır (Tayfur, 2001).

3.1.9. Taş Mastik Asfalt Üzerine Uygulanan Deneyler

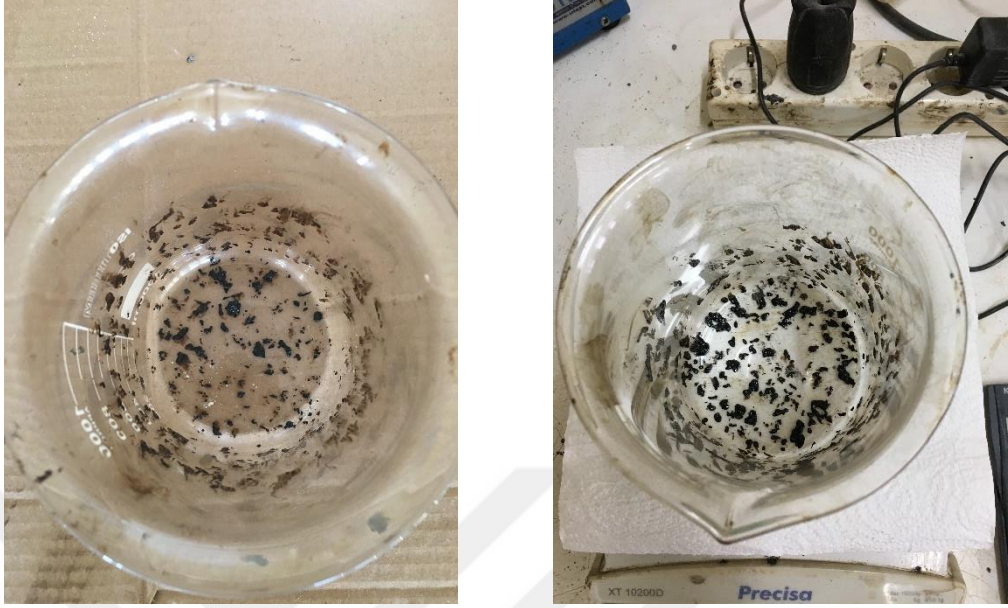
Deneyisel çalışmada numunelere Schellenberger Süzülme Deneyi, Marshall Stabilite Deneyi, Dolaylı Çekme Deneyi, Nicholson Soyulma Deneyleri uygulanmıştır.

3.1.9.1. Schellenberger Süzülme Deneyi

TMA karışımlarında diğer sıcak karışımlara kıyasla bitüm oranı daha fazladır. Bitüm oranının fazlalığıyla, taşıma sırasında bitümün süzülmesi ve aşağı yönde hareket etmesi ya da kaplama üretimi sonlandıkta sonra bitümün kusması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Marshall dizaynıyla optimum bitüm oranı belirlenerek hazırlanan karışımlar için Schellenberger bitüm süzülme deneyi yapılır ve şartname değerini sağlayıp sağlamadığına bakılır (Aslan, 2017).

Schellenber süzülme deneyinde bitümün karışımdan süzülme miktarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Normal bitümle hazırlanan karışımlarda 135 ± 5 °C ve modifiye bitümle hazırlanan karışımlarda 145 ± 5 °C olacak şekilde 1000 gr TMA karışımı hazırlanır. Hazırlanan karışım 110 °C fırında 15 dakika ısıtılmış 1000 ml'lik cam behere konularak 0,1 g hassasiyetle tartımı yapılır. Beherler üzeri kapatılarak 1 saat $\pm$ 1 dakika süre ile normal bitümlü karışımlar 175 °C sıcaklıktaki, modifiye bitümlü karışımlar ise 185 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilir. Bu sürenin sonunda karışımlar etüvden çıkartılır ve karışım beherleri sarsmadan boşaltılır. Boşaltılan beher 0,1 g hassasiyetle tartılır ve ağırlıkça kaybı yüzde olarak hesaplanır (KTŞ, 2013).

Şekil 3.4’de Schellenberger deneyi uygulandıktan sonra beher üzerinde kalan bitümler görülmektedir.



Şekil 3.4. Schellenber süzölme deneyi beher görünümleri

3.1.9.2. Marshall Stabilite Deneyi

Marshall briketleri deney şartlarına maruz bırakılmadan 3 farklı bölgeden kumpas yardımıyla yükseklikleri ölçülür ve bu değerlerin ortalaması hesaplanır. Bu hesaplanan değer daha sonra elde edilecek olan stabilite değeri hesabında düzeltme katsayısı olarak kullanılacaktır. Şekil 3.5’de briketlerin kumpas ile yükseklik ölçümü yapılmıştır.



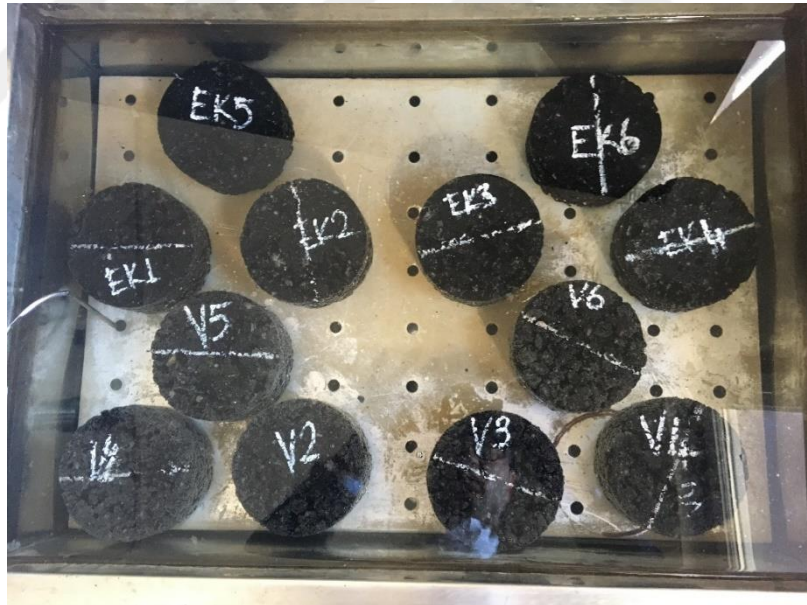
Şekil 3.5. Kumpas ile yükseklik ölçümü

Yükseklik ölçümü alınan briketler hazırlanan 60 °C'deki su banyosuna konur ve 30-45 dakika boyunca bekletilir. Briketlerin 60 °C'lik su banyosunda bekletilmesinin sebebi briketler için olabilecek en olumsuz hava şartlarını sağlayabilmektir.

Su banyosunda bekletilen briketler çıkarılmasıyla beraber en geç 30-35 sn içinde dijital göstergeli Marshall stabilite test cihazına yerleştirilir. Cihaz eksenel yönde 50,8 mm/dk sabit hızda yük uygulanır. Artacak olan yük ile deplasman değeri numune kırıldığı an azalma başlayacaktır. Göstergeden okunan briketin taşıyabildiği en yüksek yük değeri briketin stabilite değerini verirken, bu stabilite değerindeki deplasman değeri ise akma değerini verir.

Briketlerin 60 °C'de su banyosunda 30-45 dakika bekletildiği görünümü Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Marshall briketleri su banyosunda çıkarıldıktan sonra Marshall Stabilite test cihazında teste tabii tutulmuştur. Şekil 3.7'de briketin test cihazına yerleşimi verilmiştir.



Şekil 3.6. Marshall briketlerinin su banyosundaki görünümü



Şekil 3.7. Marshall stabilite test cihazı

Elde edilen değerler neticesinde bütün bitüm yüzdeleri için ortalama Marshall briketleri yükseklikleri, pratik yoğunluk (D_p), teorik özgül ağırlık (D_t), hava boşluğu (V_h) ile agregalar arası boşluk (VMA), asfalt ile dolu boşluk (V_f), düzeltilmiş stabilite ve ortalama akma değerleri hesaplanır. Bulunan ve hesaplanan bu değerler ve briketlerin bitüm oranı grafikleri çizilir. Optimum bitüm oranı genellikle hava boşluğu değeri göz önüne alınarak seçilir. TMA Tip 2 kaplamalar için boşluk oranı değeri sıcak bölgeler için % 3 - % 4 hava boşluğu aralığındadır. Sıcak bölgeler için bu iki değer ortalama ve % 3,5 hava boşluğu değerine karşılık gelen bitüm oranı, optimum bitüm oranı olarak seçilir. Hesaplanan optimum bitüm oranı değerlerinin şartname limitlerine uygun olup olmadığı kontrol edilir. Tablo 3.11’de TMA Tip 2 Aşınma tabakası şartname değerleri gösterilmektedir (KTŞ, 2013).

Tablo 3.11. TMA Tip 2 aşınma tabakası şartname değerleri (KTŞ, 2013).

Özellikler	Şartname Limitleri
Briket Yapımında Ugulanacak Darbe Sayısı	50
Hava Boşlukları, (%)	2 - 4
Agregalar Arası Boşluk (VMA) (%) min.	17
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	6,5
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks	0,3

3.1.9.3. Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı Çekme Deneyi ile, laboratuvar ortamında sıkıştırılmış olan bitümlü karışımların hızlandırılmış su tesiri sebebiyle briketlerde oluşan çap düzlemindeki çekme dayanımı hesabı yapılır (AASHTO T 283, 2013).

Karıştırma sıcaklığında bulunan agregaya optimum bitüm oranında bitüm katılarak karıştırılır. Hazırlanan karışım, 3 cm yüksekliğinde ve 30 cm çapında tepsilere dökülür ve oda sıcaklığına ulaşana kadar 2 saat beklenir. 2 saat sonunda oda sıcaklığına ulaşan karışımlar kür edilmek üzere 60 °C'deki etüvde 16 saat bekletilir. Sonrasında, karışım en az 2 saat boyunca sıkıştırma sıcaklığındaki etüvde bekletilir ve hava boşluğu oranı %6,5-%7,5 olacak şekilde yağlanan kalıplara konularak sıkıştırılır. İstenen hava boşluğu değeri darbe sayısında yapılan deneme ve yanılma yöntemiyle bulunur. Sıkıştırma işlemi tamamlanan Marshall briketleri soğumaya bırakılır ve numaralandırılır. Soğuyan briketler, hidrolik kriko ile kalıplarından çıkarılır ve kenarları fırça yardımıyla temizlenir. Briketlerin yükseklikleri 3 farklı yerden ölçülür ve değerlerin ortalaması hesaplanır. Briketlerin havadaki, sudaki ve Doygun yüzey kurusu (DYK) halindeki ağırlıkları ölçülerek hava boşluk oranları tayini yapılır. Hava boşluğu oranı en yakın olan üç briket koşullandırılırken diğer üç briket ise sızdırmaz plastik poşet içerisine konularak oda sıcaklığında muhafaza edilir (AASHTO T 283, 2013).

Briketlerden koşullandırılacak olanlar vakum kabına yerleştirilir. Briket numunelerinin yüzeyini en az 25 mm geçecek şekilde 25 °C damıtılmış su doldurulur. Kabin ağzı kapatılır ve suyun absorbe edilmesi için 10-26 inç Hg gibi bir basınç uygulanır. Uygulanacak olan vakulama işlemi 5-10 dakika olmalıdır. Vakum işleminden sonra numune 25 °C damıtık su 5-10 dakika bekletilerek %70-%80 doymun hale getirilir. İstenen doymunluğa ulaşan briketler, içerisine 10 ml su ilave edilmiş plastik poşete streç film ile sarılarak konulur. Briketler -18 °C'de 16 saat boyunca derin dondurucuda bekletilir. Süre sonun derin dondurucudan çıkarılan briketler 60 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat süre ile bekletilir. Devamında, koşullandırılmamış briketler ile beraber 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat boyunca bekletilir (AASHTO T 283, 2013).

3.1.9.4. Nicholson Soyulma Deneyi

Bu deneyde sıcaklık ve su etkisi ile bitüm ile agregası arasındaki adezyonda meydana gelen azalma belirlenmektedir. Su ve trafik etkisiyle zamanla bitüm agreganın üzerinden

soyulur. Bu deney sayesinde zamanla yağmur ve kar gibi birçok çevre koşullarında karışımlarda meydana gelen ayrılmaların olup olmayacağını ve ayrılma olması durumunda ne kadar ayrılacağını tahmin etmek mümkündür. Soyulma miktarı bitümlü bağlayıcı tipleri ve kullanılmış olan agregaların cinsine bağlı olmaktadır (KTŞ, 2013).

Soyulma dayanımı düşük olan agregaların soyulma dayanımını, kullanılacak asfalt çimentosuna belirlenen oranlarda katkı maddeleri eklenmesi sonucu arttırmak mümkündür (KTŞ, 2013).

Deneyin yapılışında; 10 ile 6,3 mm elek aralıklarında 600 gram agrega numunesi hazırlanır. 6,3 mm elekten yıkananara elendikten sonra 110 ± 5 °C etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Yıkanmış ve daha sonra kurutulmuş malzemedan 50 g alınarak behere konulur ve ısıtılmak üzere 140 °C – 150 °C’ lik etüvde 1 saat kadar bekletilir. Bitümde aynı zamanda etüvde bekletilir. Agregalar cam behere konularak beher sıcak kum banyosuna yerleştirilir. Agreganın üzerine kullanılacak olan bitüm miktarı agreganın ağırlıkça %5’ i oranında olacak şekilde belirlenir ve behere eklenir. Agregalar ile bitüm cam baget ile iyice karıştırılarak agreganın bitüm ile kaplanması sağlanır. Ardından karışımın olduğu beher 60 °C’ lik etüve konularak 24 saat bekletilir. Süre tamamlandıktan sonra beher dışarı alınır ve karışımlar cam baget ile petri kabına boşaltılır. Kaplanmış mıcırklar birbirinden tamamen ayrı olacak şekilde yerleştirilir. Petri kaplarına su eklenir ve 60 °C’ lik etüve konularak 24 saat bekletilir. Daha sonra bu kaplardaki su boşaltılıp yeniden su eklenir ve yandan gelen bir ışıkla beraber göz ile inceleme yapılır. Soyulmaya karşı dayanıklılık, tüm agrega danelerinin soyulmamış olan yüzeylerinin bütün yüzeye oranı hesaplanarak elde edilir (KTŞ, 2013).

3.1.10. Taş Mastik Asfat Avantajları

- TMA karışımı, sahip olduğu dayanım özelliği yüksektir. Bu yüzden TMA kaplamalar diğer kaplama türlerine göre uzun hizmet ömrü sunar.
- TMA karışımı yüksek dayanım özelliğiyle kalıcı deformasyonlara karşı yüksek stabilite ve yüksek aşınma direnci sağlar.
- Yol kaplamalarında ki tekerlek izi oluşumuna karşı TMA kaplamaları yapısı gereği daha dirençlidir.

- TMA kaplamalarda gütültü seviyesi diğer sıcak karışımlara göre daha düşüktür.
- TMA'nın yüzey dokusunun daha iri olmasıyla, kaplama yüzeyin daha çok su tutabilmektedir. Yüzeyde suyun daha az görünmesi trafik güvenliği sağlar ve su sıçramasını engeller.
- Yaşlanmaya karşı direnci yüksektir. TMA kaplamaları soyulma ile yüzey çatlağı (sıcaklık ve trafiğin etkisine bağlı) ve sökölme gibi bozulmalara karşı daha dirençlidir. Daha az bakım gerektirdiğinden uzun vadede TMA kaplamaları daha ekonomiktir.
- Yüksek kaplama sıcaklıklarında deformasyon direnci sağlar.
- Düşük sıcaklık performansı iyidir (Blazejowski, 2011; EAPA, 1998; NAPA, 1999; Temren, 2009; Tunç, 2001).

3.1.11. Taş Mastik Asfalt Dezavantajları

- İşlenebilirliği düşük olduğu için daha iyi bir işçilik gerektirir.
- Polimer modifiyeli karışımlarda istenilen yüksek sıcaklığın korunabilmesi ve şantiye sahasına erişebilmesi için nakliye mesafeleri sınırlandırılabilir.
- TMA karışımı 40 °C'a kadar soğumadan trafiğe açılması haline bağlayıcı yüzeye toplanacaktır. Bu yüzden yolun trafiğe açılması zaman alabilir
- TMA kaplamalarının özelliği gereği yüzeyde biriken kalın bağlayıcı filmi trafik etkisi altında yok oluncaya kadar başlangıç kayma direnci yüksek olacaktır. Bu nedenle yol trafiğe açılmadan TMA kaplaması serimi sırasında 0-2/5 mm kırmataş mıcır serilmesi gerekmekte ya da düşük hızda seyir için sürücüler uyarılmalıdır.
- Kaplama içerisindeki elyaftan dolayı karışım sıcaklığı artar. Bu yüzden geleneksel BSK'lara nazaran TMA çok sıcak bitümlü bir karışımdır.
- Yüksek bağlayıcı oranı, daha dayanıklı ve özel agrega kullanımı ve ilave fiber kullanımı nedeniyle maliyeti yüksektir (Blazejowski,2011; Campbell, 1999; Temren, 2009).

3.2. Vermikülit

Vermikülit mineralojik gruplarda tek başına farklı bir gruptur. Endüstriyel gruplarda ise genişleme özelliğine sahip mika grubu olan biotit, hidrobiotit ve flogopit gibi mineralleri de kapsayan genel bir terim olarak kullanılmaktadır. (Toksoy, 1997).

Genelde bir çeşit trioktahedral mika minerali olarakta bilinen vermikülit, çabuk ısıtma işlemiyle genişleyerek yaprak şeklinde katmanlara ayrılan bir şekle dönüşür. Vermikülitin oluşum şekli ve bulunduğu ortamına göre, toprak, otojenik, metaformik ve makroskopik olarak dört tipi mevcuttur (Strand,1983). Vermikülit yeşil, sarımsı, kahve ve hatta siyah renkte olabilir. Vermikülitin bu denli genişlemesinin nedeni yapısında bulunan kristal suyun ani olarak buharlaşmasından dolayı oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu denli yüksek genişleme olayının sebebinin henüz tam olarak açıklanamamasının nedeni ise ağırlıkça aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişleme göstermesidir. Vermikülitte uygulanan işlem sonrası malzemenin yoğunluğu, 0,8 gr/cm³'den 0,08 gr/cm³'e kadar yaklaşık 10 kat düşmektedir. Bu düşüşün nedeni, vermikülitin kalitesi ve genişletme yapılan fırının performansına bağlıdır (Toksoy, 1997;Weisman, 2010). Vermikülitin kimyasal birleşimi ile yaprakları arasında mevcut olan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunduğu vermikülitin genişleme olayını etkiler.

Yeşil, sarımsı kahve ve siyah renklerde bulunan ve sistemli dizilime sahip olan vermikülit, monoklinik sistemde kristallenir. Sertliği Mohs ölçeği ile 1,2 - 2,0 arasında, özgül ağırlığı ise 2,4-2,8 gr/cm³ değer aralığındadır (Toksoy, 1997;Weisman, 2010). Yüksek ısıya maruz kalan vermikülitin renginden değişiklik olabilir (Weller, 2010). Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de işlenmemiş ham vermikülit örneği ile ısıya maruz bırakılarak renk değiştiren vermikülit gösterilmiştir (Weller, 2010).



Şekil 3.8. İşlenmemiş ham vermikülit (Weller, 2010)



Şekil 3.9. Isıya tabi tutulmuş vermikülit (Weller, 2010)

Dünyadaki vermikülit cevher numunelerinin kimyasal analizleri Tablo 3.12’de verilmektedir.

Tablo 3.12. Ticari değerleri olan vermikülitlerin kimyasal analizleri (Harben ve Kuzbart, 1996)

	Enoree ABD	Virginia ABD	Güney Afrika	Brezilya	Çin	Kovdor Rusya
Li ₂ O	-	0.01	0.03	-	-	-
Na ₂ O	-	1.72	0.80	0.10	1.61	0.93
K ₂ O	4.42	6.63	2.46	0.50	5.97	2.56
MgO	20.04	16.38	23.37	23.60	24.22	21.39
CaO	0.75	1.12	1.46	3.80	0.93	0.20
BaO	0.12	-	-	0.20	-	0.03
MnO	0.07	0.14	0.30	-	0.05	-
FeO	-	-	1.17	-	1.54	3.56
Al ₂ O ₃	17.36	12.85	12.08	10.20	12.68	10.01
Cr ₂ O ₃	0.50	0.23	-	-	-	0.20
Fe ₂ O ₂	8.45	8.80	5.45	5.80	4.60	1.90
SiO ₂	38.66	38.34	39.37	45.10	41.20	43.05
TiO ₂	-	1.66	1.25	0.70	1.38	1.00
H ₂ O	8.71	10.66	11.20	10.20	5.82	15.70
Toplam	98.61	99.34	98.97	100.00	99.99	99.40

3.2.1. Başlıca Vermikülit Çeşitleri

Vermikülitler doğada oluşum şekli ve bulunduğu ortama göre; metaformik, makroskopik, otojenik ve kil vermikülit olarak görülmektedir (Toksoy, 1997).

3.2.1.1. Kil Vermikülitler

Kil vermikülitler; toprak vermikülit adıyla da isimlendirilirler. Kil vermikülitler dioktahedral makroskopik vermikülitlerin dışında, hem dioktahedral hem de trioktahedral olabilirler.

Kil vermikülit, asidik ve yükseltgen koşullarda alkali ve kalsiyumca zengin minerallerin (toprak fillosilikatların) tabakalarının arasından Potasyum (K)'un kristal yapıdan çıkarak yerine Magnezyum (Mg) ile Kalsiyum (Ca)'un geçmesi, Ferroz (Fe^{2+}) iyonunun Ferrik (Fe^{3+}) iyonuna yükseltgenmesi ile oluşmaktadır. Vermikülitin, çoğunlukla biyotitin bozunması ile oluşumu kristal yapısının benzerliğine bağlanmaktadır. Şekil 3.9'da kil vermikülitin işlenmemiş hali görülmektedir (Dolares, 2006).



Şekil 3.10. Kil vermikülit (Dolares, 2006)

2.3.1.2. Otijenik Vermikülit

Deniz suyu yapısında bulunan Potasyum (K^{+}) içeriği ana mineraldeki Potasyum (K)'un uzaklaşmasını engeller. Bu yüzden deniz ortamında mika ve klorit değişimi sonucu oluşan vermikülitte sık rastlanmaz. Denizel ortamda vermikülitte ilk defa Singer ve Stoffer yaptıkları çalışmalarda diğer sedimanter mineraller olarak rastlamışlardır (Singer ve Stoffer, 1981). Bu vermikülit oluşumuna, volkanik aktivenin ile metallojenik su akıntılarının yoğunlukla olduğu bölgelerde rastlanmıştır.

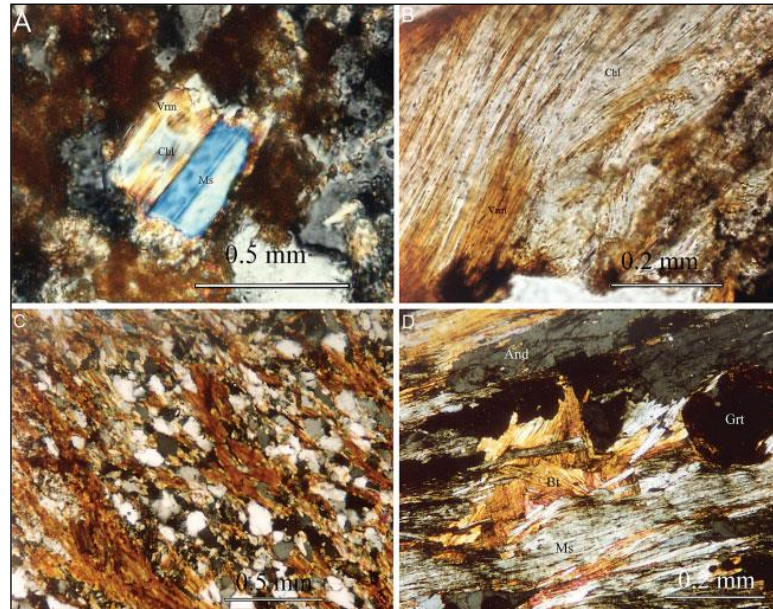
Vermikülit ile birlikte, hidrotermal etkilerle oluşan talk ve serpentinin bulunması ayrıca mineralin idomorf kristal yapılaşmaya sahip olması hidrotermal orijinin göstergesi

olmuştur. Oluşan bu vermikülitin Demir (Fe), Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) kanyonları ve doymuş sıvılardaki kanyonların çökmesi ile oluştuğu düşünülmektedir. Hidrotermal vermikülitte diğer vermikülitlere oranla su içeriği daha az olmasına rağmen, Alüminyum (Al)'un Silisyum (Si) yerine geçişi daha fazladır. Ayrıca tetrahedral tabakasında da Demir (Fe) içerir (Toksoy, 1997).

2.3.1.3. Metamorfik Vermikülit

Metamorfik vermikülit, birçok araştırmacı tarafından demirce zengin kloritin dönüşümüyle oluşan ve metasedimanlar içerisinde lavsonit bulunan vermikülitler olarak nitelendirilmişlerdir. Kloritten dönüşüm ise; düşük sıcaklıkta ortama alkali girişi ve Demir (Fe), Magnezyum (Mg) ve bazen Alüminyum (Al)' un ortamdan çıkışıyla gerçekleşir (Dolares, 2006).

Metamorfik vermikülitin yapısı, biyotit ve stiliplomelaninkine benzemesine karşın kimyası kloritinkine benzemektedir. Metamorfik vermikülit az miktarda da olsa Potasyum Oksit (K_2O) ile Kalsiyum Oksit (CaO) içerirken kloritte bu oksitler yoktur ve silis bakımından kloritten daha zengindir. Alüminyum içeriği bakımından ise biyotitine göre daha zengindir. Şekil 2.5'te metamorfik vermikülitin mikro yapısı görülmektedir (Dolares, 2006).



Şekil 3.11. Metamorfik vermikülitin mikro yapısı (Serfass, 1996)

2.3.1.4. Makroskopik Vermikülit

Makroskopik vermikülit, mikanın hidrasyonu sonucu oluşan trioktahedral mika-benzeri bir mineraldir. Elastik olmayan, ince bükülebilir levhaları ve dilinim yapısına sahip büyük levhamsı kristaller halinde gözlenir. Renk olarak parlayan yeşilimsi-sarı ve siyah, kahverengi, altın ve bal sarısı ile bronz gibi renklerde gözlenir. Mikalara göre daha yumuşaktır. Mohs ölçeğine göre sertliği 2.0'dir. Erime noktası 1320- 1350°C arasındadır (Toksoy, 1997).

3.2.2. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Durumu

Dünya üzerinde en önemli vermikülit rezervleri Avustralya, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ile Güney Afrika Cumhuriyeti'nde bulunmaktadır. Bu ülkelerin dışında Arjantin, Brezilya, Bulgaristan, Çin, Finlandiya, Fransa, Mısır, Hindistan, Meksika, Kanada, Şili, Japonya, Kore, Cezayir, İspanya, Sri Lanka, Tanzanya, Kazakistan, Türkiye, Uganda ile Zimbabve'de de vermikülit yatakları bulunduğu bilinmektedir. Dünyada üzerinde bulunan vermikülit rezervinin toplam 50-60 milyon ton olduğu ayrıca toplam vermikülit kaynaklarının 200 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Ancak bununla beraber bu miktar hakkında detaylı bilgiye ulaşmak da mümkün değildir. (Toksoy, 1997). Tablo 3.13'te, dünya üzerinde bulunan vermikülit rezervleri ile baz rezervleri gösterilmekte, Tablo 3.14'te ise 2004-2008 yılları arasında ülkelere göre vermikülit üretim miktarları ton bazında verilmiştir (Atmaca ve Çorbacıoğlu, 1998; Erseçen, 1992).

Tablo 3.13. Dünyada bulunan mevcut vermikülit rezervleri dağılımı (ton) (Erseçen, 1992).

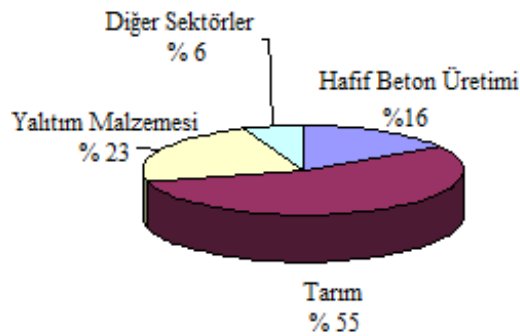
ÜLKELER	REZERV	BAZ REZERV
ABD	25.000	100.000
G. AFRIKA CUMHURİYETİ	20.000	80.000
DİĞER ÜLKELER	5.000	20.000
DÜNYA TOPLAMI	50.000	200.000

Tablo 3.14. Dünyada 2004-2008 yılları arasında vermikülit üretimi (Atmaca ve Çorbacıoğlu, 1998).

Ülke	2004	2005	2006	2007	2008
Rusya	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Mısır	400	6.700	6.700	5.770	7.560
Güney Afrika	196.893	209.801	197.765	199.664	199.764
Uganda	2.688	2.574	3.512	3.269	-
Zimbawe	27.150	23.045	13.412	13.000	13.000
ABD	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Arjantin	1.293	1.403	1.585	1.726	1.900
Brezilya	26.000	24.191	19.279	18.952	20.000
Çin	100.000	100.000	110.000	110.000	110.000
Hindistan	3.378	6.675	11.828	10.802	13.369
Japonya	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Avusturalya	9.676	8.769	9.392	8.900	8.391
TOPLAM (ton)	503.478	519.158	509.473	508.083	509.984

Vermikülitin çoğunlukla yapı malzemesi sektöründe kullanılmaktadır ancak diğer pek çok sektörde de kullanılmaktadır. Vermikülitin dünyada sektörlere göre kullanımının dağılımı şekil 3.11’de verilmiştir.

Türkiye’de yapılan jeolojik çalışmalar ile beraber ortaya çıkan ofiyolit kuşaklarında vermikülit oluşumlarına rastlanmıştır ancak vermikülit yataklarının varlığı tam olarak bilinmemektedir (Toksoy, 1997). Malatya-Darende-Kuluncak, Sivas-Yıldızeli-Demircik-Karakoç, Eskişehir-Sarıcakaya ile Elazığ-Harput-Arduçluk Türkiye’de vermikülit yataklarının başlıcalarıdır (DPT, 2001).



Şekil 3.12. Vermikülitin dünyada kullanım alanları (Atmaca ve Çorbacıoğlu, 1998).

Türkiye’ de vermikülitin zengin rezervlere sahip olduğu bilinmektedir. Ancak yeterli çalışmanın olmaması, ülkemizde malzemenin pek bilinmemesi ve bu neden yatırım yapılmayışı ile Pazar oluşturmamasından dolayı rezervler henüz değerlendirilememiştir. Türkiye vermikülit rezervi, yapılan rezerv hesaplarında yaklaşık 6-7 milyon ton olduğunu ifade edilmektedir. Sivas-Yıldızeli’nde bulunan vermikülit rezervinin Türkiye’deki bilinen en büyük ayrıca işletilen tek vermikülit yatağı olduğu belirtilmektedir. Bu saha da Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA)’nın yaptığı saha gözlemleri ile değerlendirmeler sonucunda vermikülitin iki çeşit özelliğe sahip olduğu tespit ve genleşme özelliği iyi olan rezervin 2.750.000 ton olduğu, genleşme özelliği daha düşük olan rezervin ise 2.475.000 ton olduğu görülmüştür. Bugüne kadar ülkemizde keşfedilen vermikülit oluşumlarının hepsi alkali damar kayaçları yada intrüzifleri ile kesilen ultramafik ve mafik kütleler içerisinde. Dünyadaki bütün ticari vermikülit oluşumlarının büyük çoğunluğu buna benzer ana kayaçlar içerisinde (Toksoy, 1997; DPT, 2001; Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2007). Tablo 3.15’te Türkiye’de üretimi yapılan vermikülit miktarı verilmektedir.

Tablo 3.15. 2012-2016 yılları arasında Türkiye’de üretilen vermikülit miktarı(ton)

Yıllar	2012	2013	2014	2015	2016
Üretim	0	1.604	716	425	1.050

Vermikülite uygulanan teknolojik testlerde genleşme oranının ortam koşullarına göre 13 ve 18 kat arasında arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen malzemenin yığın yoğunluğuna göre yapılan sınıflamada ise 2. sınıf malzeme kalitesinde olduğu görülmüştür (Ekinci ve Yeniboğanlı, 1995).

Ülkemizde tüketimin çoğunluğu ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Aynı zaman da tüketim de son derece düşük miktarlardadır.

3.2.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Yöntemi

Mevcut vermikülit sahalarında üretim açık ocak işletmeciliği yöntemine göre yapılmaktadır. Vermikülit sahalarına yakın bölgede kurulmuş olan cevher zenginleştirme ünitesi ile vermikülite zenginleştirme işlemi yapılır. Daha sonra vermikülite genleştirme işlemi uygulanır. Ocaktan çıkarılan cevher birincil kırıcıdan geçirildikten sonra yaş elek yöntemiyle harmanlama yapılarak bölünmüş hallerine ayrılır (Toksoy, 1997).

Vermikülite harmanlama işlemi uygulandıktan sonra konsantreler toplanır, kurutulur, boyutlarına ayrılır ve genleştirme ünitesine yönlendirilir. Vermikülitin rutubet alma özelliğinden dolayı depolanma işlemlerinin kapalı alanlarda yapılması son derece önemlidir. Aksi durumda vermikülitin genleştirme işleminin yapılabilmesi için gerekli enerji miktarı ile maliyetinde belirgin artışlar oluşmaktadır. Genleştirme işlemine tabi tutulacak olan ham vermikülit konveyör yardımı ile 6-7 metre yüksekliğinde bulunan içi seramik/tuğla kaplı yüksek fırın üzerine çıkarılır (Anonim, 2011). Malzeme fırın içindeki yukarıdaki plaklardan düşerken alevle karşılaşmaktadır. Genleşen ve yoğunluğu azalan taneler ile tozlar bir fan aracılığıyla çekilmekte ve daha sonra siklon yardımı ile birbirinden ayrılmaktadır. Genleşme ünitesinde, 900- 1000°C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilen taneler, ani ısı etkisiyle genleştirilir. Genleşmemiş kısımlar harmanlama yöntemi ile genleşenlerden ayrılır. Genleşmiş olan ürün, torbalanır ve pazarlanmaya hazır hale getirilir (Toksoy, 1997). Şekil 3.12'de vermikülitin üretim aşamalarının şematik olarak gösterimi verilmiştir. (Tayfur, 2001).

Ham vermikülitin genleştirme işleminde düşey, eğimli, döner ve toroidal tip fırınlar kullanılmaktadır. Düşey fırınlarda vermikülit yukarıdan aşağı düşerken sıcak bölgeden geçerek genleşir ve aşağıya düşer.

Vermikülite uygulanan işlemler sonrası kullanılabilir hale gelen vermikülitin ilk hali ile genleştirilmiş hali Şekil 3.12'de üretim aşamalarından sonraki hali olarak verilmiştir.

standardize edilen, tane boyu dağılımına göre yapılan sınıflama esas alınmaktadır. Tablo 3.16’da tane boyu dağılım sınıflandırması gösterilmiştir (Toksoy, 1997).

ABD’de kullanılan saf vermikülitin sınıflandırılması da Tablo 3.17’ de verilmiştir. Tablo 3.18’de ise ABD’de kullanılan, elekten geçen vermikülit miktarı ile yoğunluğuna göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 3.16. Vermikülitin tane boyu dağılımına göre sınıflandırılması (Toksoy, 1997)

Kare gözlü elek üzerinde biriken miktar, % ağırlıkça							
Elek gözü açıklığı, mm							
Sınıf	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,06 mm	0,30 mm	0,15 mm
1	30 - 80		80 - 100				
2	0 - 10			90 - 100			
3		0 - 10	45 - 90		95 - 100		
4			0 - 10		90 - 100	60 - 98	90 - 100
5				0 - 5			

Tablo 3.17. Amerika’da kullanılan saf vermikülitin tane boyu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması (Harben ve Kuzvart, 1996)

Sınıf	Tane Boyu (μm)	Yoğunluk (Kg/m^3)
1	6,680 - 1,700	800 - 1,040
2	2,360 - 1,180	800 - 1,040
3	1,700 - 425	800 - 1,040
4	600 - 212	720 - 1,040
5	-425	640 - 800

Tablo 3.18. Amerika’da kullanılan saf vermikülitin elekten geçen miktarı ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması (Strand,1983)

Sınıf	1	2	3	4	5
Elek Gözü Açıklığı	Elek üstünde biriken miktar (%)				
9.05 mm	0-10				
4.75 mm	30-60	0-5			
2.36 mm	65-95	20-80	0-10		
1.18 mm	85-100	75-99	20-60	0-5	
600 μm		90-100	65-95	15-65	0-10
300 μm			75-98	60-98	10-50
150 μm			90-100	90-100	55-85
Yoğunluk (kg/m^3)	64-112	64-128	80-128	96-160	128-176

3.2.4.2. Kimyasal Özellikleri

Monoklinik sistemde kristalleşen vermikülitin X-ray çalışmalarında mika veya kloritten farklı olarak belirli bir tip teşkil ettiği gösterilmektedir. Karakteristik bir vermikülitin kimyasal bileşenlerinin önemli bir kısmını SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO elementleri oluşturmaktadır. Tablo 2.8’de tipik bir vermikülitin kimyasal analizi görülmektedir (Anonim, 2011).

Tablo 3.19. Tipik vermikülitin kimyasal analizi (Anonim, 2006)

Element	Ağırlıkça oranı (%)
SiO_2	38 - 46
Al_2O_3	10 - 16
MgO	16 - 35
CaO	1 - 5
K_2O	1 - 6
Fe_2O_3	6 - 13
TiO_2	1 - 3
H_2O	8 - 16
Diğer	0.2 - 1.2

3.2.5. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları

Vermikülitin ham halde kullanımı oldukça az olduğundan endüstride genleştirilmiş olarak kullanılmaktadır. 1950’lere kadar inşaat sektöründe vermikülit, ısı yalıtım özelliği olmasıyla dolgu malzemesi ile blok olarak, hafif agregalar olaraksa alçı ile sıvalarda kullanılmıştır. 1950’lere gelindiğinde fiziksel ve kimyasal özelliklerinin araştırılması ile vermikülit diğer birçok alanda da kullanılmaya başlamıştır (Toksoy, 1997).

Genleştirilmiş vermikülit, hafif yapı malzemelerinde agrega yerine, binalarda ısı ve ses yalıtımlarında, soğuk depoların yalıtımlarında, dekorasyon işlerinde, tavan kubbe kaplamalarında ve yüksek ısı ile çalışılan yerlerde ateşe dayanıklı sıva ve kaplama malzemesi üretiminde kullanılmaktadır (Toksoy, 1997).

Vermikülitin tarımda da önemli bir yeri vardır. Vermikülit toprağın özelliğini iyileştiren katkı olarak bahçelerde, spor sahalarında, golf sahalarında, parklarda ve daha birçok zirai yerde kullanılmaktadır. Ayrıca zirai ilaçlarda ve gübrelerde de katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Toksoy, 1997).

Vermikülit, büyükbaş hayvan yetiştiriciliğinde, pekmez ve vitaminlerle karıştırılarak yem olarak verilir. Fazla su tutma özelliği nedeniyle, iyi bir dengeleyici olarak kabul edilmektedir (Anonim, 2006).

Genleştirilmiş vermikülit başlıca su alanlarda kullanılmaktadır (Evans, 1993).

- Hafif beton yapıları ve harçlarda,
- Vermikülit sıvalarında,
- Gevşek yalıtım dolgularında,
- Yangına karşı koruyucu malzeme üretiminde,
- Seracılıkta katkı olarak,
- Yapılandırma ve yüksek ısı yalıtımlarında,
- Sürtünme balatalarında,
- Özel kaplama conta ve keçelerde,
- Yüzme havuzu yalıtımında,
- Paketleme makinelerinin yapımında,
- Hayvan yemi olarak kullanılmaktadır.

3.2.5.1. Vermikülitin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımı

Zhang vd. (2013-a), çalışmalarında (Stiren-Butadien-Stiren)SBS ile genleştirilmiş vermikülitli birlikte kullanarak EVMT/SBS modifiye bitümün yaşlanma, yumuşama noktası ile penetrasyon değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında SBS katkılı bitüm ayrıca bu bitüm ile modifiye edilmiş, genleştirilmiş vermikülit modifiye SBS bitüm (EVMT/SBS), setiltrimetil amonyum bromür ile genleştirilmiş vermikülit modifiye SBS

bitüm (CTAB-EVMT/SBS), oktadesil dimetil benzil amonyum klorür ile genleştirilmiş vermikülit modifiye SBS bitüm (ODBA-EVMT/SBS) olmak üzere 4 farklı bitümlü sıcak karışımı incelemiştir. Sonuç olarak SBS katkılı bitmün yaşlanmayı azalttığı ayrıca genleştirilmiş vermikülit modifiye bitümünde sünekliği ve penetrasyonu attırdığını belirtmiştir. ODBA-EVMT/SBS'lerin, SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri üzerinde genleştirilmiş vermikülitlerden (EVMT/SBS) daha etkili olduğunu göstermişlerdir. EVMT/SBS'lerin eklenmesiyle SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası ve viskozite değerleri artarken penetrasyon ve düktilitesi azalmıştır, bu etkiler ODBA-EVMT/SBS ilavesi EVMT ile SBS arasında uygunluk sağladığı için daha belirgin olmuştur. İnce film halinde etüv deneyi sonuçlarına göre, SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların viskozite yaşlanma indisi EVMT/SBS ve ODBA-EVMT/SBS ilave edilmesiyle azalmıştır. ODBA-EVMT/SBS modifiye bitümünde (CTAB-EVMT/SBS) modifiye bitüm ile karşılaştırıldığında ODBA-EVMT/SBS modifiye bitümün yaşlanma direncine daha iyi etki ettiğini söylemiştir (Zhang vd., 2013).

Zhang vd. tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise ODBA-EVMT/SBS ve nano-çinko oksidin, termal oksidasyon ve ultraviyole (UV) yaşlanma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Organik genleştirilmiş vermikülit bitümlü bağlayıcının termal oksidasyon direncini arttırırken nano çinko oksit ise bitümlü bağlayıcının UV yaşlanma direncini belirgin şekilde iyileştirmiştir (Zhang vd., 2015; Zhang vd., 2013).

Zhang vd. tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise EVMT/SBS ve üç tip inorganik nano parçacık kullanarak gerçekleştirilen bitüm modifikasyonu değerlendirilmiştir. EVMT/SBS ve inorganik nano parçacıkların bitümlü bağlayıcının fiziksel ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, nanomalzeme ilave edilmesinin bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerini çok az etkilediğini göstermiştir. Nanomalzemelerin bitümlü bağlayıcının termal ve UV yaşlanma direncini aynı şekilde geliştirdiği çalışma sonucunda görülmüştür. Ayrıca, bu iyileşmenin inorganik nanoparça tipine bağlı olduğu saptanmıştır. %1 EVMT/SBS ve %3 nano çinko oksit içeren bitümlü bağlayıcıların nano silika ve nano titanyom dioksitle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılardan daha düşük viskozite yaşlanma indisi değerine dolayısıyla daha yüksek uzun dönem yaşlanma direncine sahip olduğu belirlenmiştir (Zhang vd., 2015).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Kullanılan Malzemeler ve Deney Sonuçları

4.1.1. Agregası

Çalışmada Ankara-Eskişehir illeri arası yol üstyapısı yapım işinde kullanılan Yakupabdal taş ocağından elde edilen (0-5 mm), (5-10 mm), (10-19 mm) bazalt agregası, Hisarlıkaya taş ocağından elde edilen kalker filler kullanılmıştır.

4.1.1.1. Agregası Deney Sonuçları

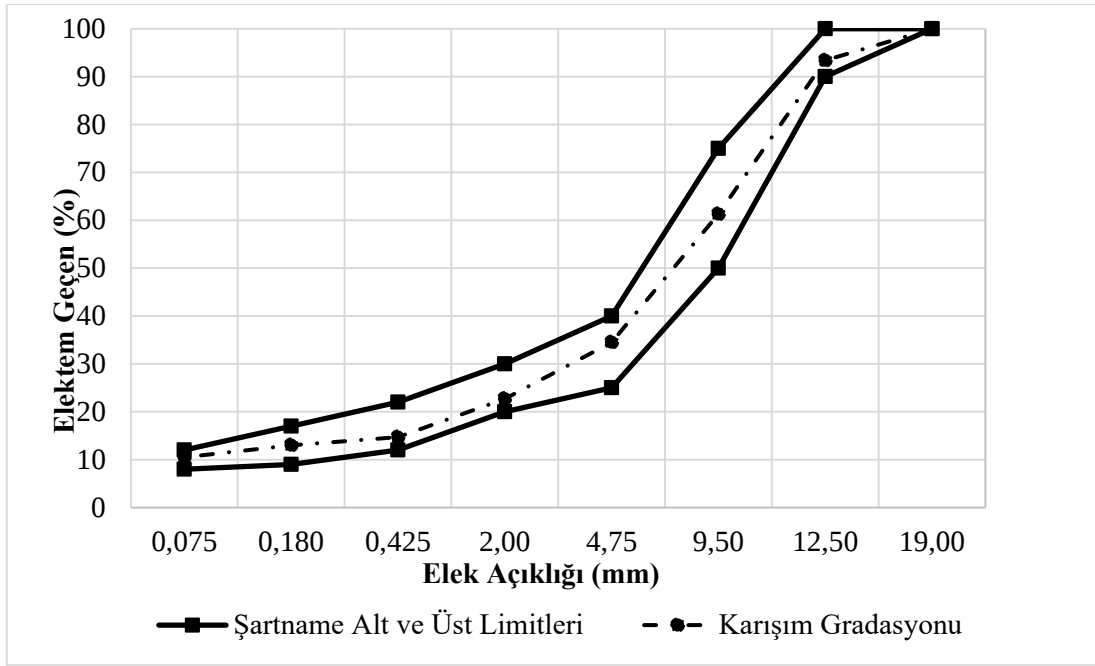
4.1.1.2. Elek Analizi

Yapılan çalışmada kullanılan agregası KGM şartnamesinde TMA Tip-1 için belirtilen elek serisi kullanılarak elek analizine tabi tutulmuştur.

Tablo 4.1. TMA aşınma gradasyon ve tolerans sınırları (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		TMA TİP-1	Karışım Gradasyonu (%, Geçen)
		A	
inch	mm	Geçen %	%
¾	19,0	100-100	100
½	12,5	90-100	93,4
3/8	9,5	50-75	61,3
No 4	4,75	25-40	34,5
No 10	2,00	20-30	22,7
No 40	0,42	12-22	14,7
No 80	0,177	9-17	13,0
No 200	0,075	8-12	10,5

Tablo 4.1’de TMA karışım gradasyonu ve şartname sınırları, Şekil 4.1.’de ise agregası granülometri eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.1. TMA karışımlarında kullanılan agrega granülometri eğrisi

4.1.1.3. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi

Kaba agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi ASTM C127 ve AASHTO T 85 deney standartlarına göre yapılmıştır. Deney için karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde 2000 gr. kaba agrega alınarak 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. 24 saat suda bekletilerek doymun hale gelmesi sağlanan kaba agrega karışımı kuru bir bez yardımıyla agrega üzerinde sıvı film tabakası görünmez hale gelene kadar kurularak yüzey kuru doymun hale getirilerek, havadaki ağırlık (B), 24 °C sudaki ağırlık (C) belirlenmiştir. Numune 110 °C'deki fırında tamamen kuru hale getirilerek kuru ağırlığı (A) belirlenmiştir. Şekil 4.2'de 24 saat suda bekletilen tasarım gradasyonunu temsil eden kaba agregalar gösterilmiştir (Arslan, 2020).



Şekil 4.2. Su dolu tepsi içerisinde bekletilen kaba agrega

$A/(B-C)$ formülü yardımıyla kaba agreganın hacim özgül ağırlığı,

$A/(A-C)$ formülü ile zahiri özgül ağırlığı,

$[(B-A)/A] \times 100$ formülü ile su absorpsiyonu hesaplanmıştır (ASTM C 127, 2001; AASHTO T 85, 2014).

İnce agrega hacim özgül ağırlık ve su emme deneyi ASTM C 128 ve AASHTO T 84 deney standartlarına göre yapılmıştır. Deneyde karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde alınan 500 gr. ince agrega numunesi 24 saat su içerisinde bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. Deneyde 500 ml hacminde balon joje kullanılmıştır. Piknometre kalibrasyon çizgisine kadar 25 °C saf su ile doldurularak ağırlığı belirlenmiştir (B). 24 saat suda bekletilen deney numunesi yüzey kuru doymun hale getirilerek ağırlığı belirlenmiştir (S). Numunenin yüzey kuru halde olup olmadığını tespit etmek amacıyla Abraham hunisi deneyi uygulanmıştır. Numune tanecikleri arasındaki kohezyonu kaybettiğini anda yüzey kuru hale karar verilmiştir. Yüzey kuru numune 25 °C bir miktar su ile balon joje içerisine konularak 15 – 20 dakika sarsma uygulanmıştır. Bu sarsma sayesinde numune içerisindeki hava tanecikleri uzaklaştırılmıştır. Balon joje kalibrasyon çizgisine kadar su ile doldurularak ağırlığı belirlenmiştir (C). Daha sonra numune piknometreden çıkarılarak 110 °C fırında tamamen kuru hale gelene kadar bekletilmiş ve kuru numune ağırlığı belirlenmiştir (A). Şekil 4.3'te 24 saat suda bekletilen tasarım gradasyonunu temsil edecek ince agrega gösterilmiştir.



Şekil 4.3. 24 saat suda bekletilen ince agrega

$A/(B+S-C)$ formülü ile hacim özgül ağırlık,

$A/(B+A-C)$ formülü ile zahiri özgül ağırlık hesaplanmıştır (ASTM C 128 2018; AASHTO T 84, 2012).

Filler agrega hacim özgül ağırlığı hesabı ASTM C 128, AASHTO T 84 ve TS EN 1097 deney standartlarına göre yapılmıştır. Deneyde No.200 elekten geçirilen 100 gr. kalker filler agrega, 250 ml hacminde balon joje ve 25 °C saf su kullanılmıştır. Sırasıyla balon joje boş ağırlığı (A), kalibrasyon çizgisine kadar su ile doldurulan balon joje ağırlığı (B), balon joje ve numune ağırlığı (C), balon joje, numune ve su ağırlığı (D) belirlenmiştir. Numune balon jojeden çıkarılarak 110 °C etüvde tamamen kuruyana kadar bekletilerek ağırlığı (E) belirlenmiştir. Şekil 4.4'te 25 °C su banyosunda bekletilen balon joje içerisinde filler ve ince agrega numuneleri verilmiştir.



Şekil 4.4. 25°C Su banyosundaki ince ve filler agrega numuneleri

$E/((B-A)-(D-C))$ formülü ile zahiri özgül ağırlık hesaplanmıştır (ASTM C 128, 2018; AASHTO T 84, 2012; TS EN 1097, 2013). Elde edilen deney sonuçları ve diğer agrega özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kullanılan agrega özelliklerinin deneysel ve hesapsal sonuçları

	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler
Hacim Özgül Ağırlık	2,503	2,490	
Zahiri Özgül Ağırlık	2,562	2,555	2,618
Su Emme	0,92	1,02	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Deneyle)			2,536
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Hesapla)			2,539
Agrega Karışımının Hacim Özgül Ağırlığı			2,511
Agrega Karışımının Zahiri Özgül Ağırlığı			2,566
Mg₂SO₄ Donma Kaybı			1,8
Los Angeles Deneyi (%)			11
Yassılık İndeksi (%)			12,9
Metilen Mavisi			1,75

4.1.2. Bitümlü Bağlayıcı

Yapılan deneysel çalışmada Karayolları Kayseri Bölge Müdürlüğü’nün Orta Anadolu Petrol Rafinerisinden temin ettiği 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır..

4.1.2.1. Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları

Bitümlü bağlayıcı üzerine geleneksel olarak uygulanan özgül ağırlık, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi ile birlikte dönel viskozimetre deneyi uygulanmıştır.

4.1.2.1.1. Geleneksel Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri

TMA karışımlarda kullanılacak geleneksel bitümin özellikleri Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Deneyisel çalışmada kullanılan geleneksel bitümlü bağlayıcının özellikleri

Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri		Deney Standardı
Özgül Ağırlığı	1,03	TS 1087
Penetrasyon	57	TS EN 1426
Yumuşama Noktası	49	TS EN 1427

4.1.2.1.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ile sıkıştırma sırasında doğru sıcaklığa sahip olması yapım kolaylığı ve kaplamanın ömrü açısından büyük öneme sahiptir. Bağlayıcı sıcaklığının düşük olması boşluk oranının fazla olmasına sebep olurken, yüksek olmasıysa bağlayıcının aşırı yaşlanmasına ile sıkışmanın fazla olmasına neden olmaktadır. Deneyisel çalışmada yapılacak TMA karışımlarının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek için dönel viskozimetre deneyi kullanılmıştır. Dönel viskozimetre deneyi ile bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristikleri belirlenmektedir. Deney yapılırken ASTM D 4402 standardından yararlanılmıştır. Deney aletinde, bağlayıcı içerisinde dönen bir milin (20 rpm hızla), dönmeye karşı gösterdiği direnç yardımıyla viskozite değerleri elde edilmektedir. Sıkıştırma sıcaklığını bulmak amacıyla 135 °C’de 2 saat fırında ısıtılan yaklaşık 11 gr. numune sabit 135 °C ulaşmış sıcaklık kontrollü numune bölmesine konularak 15 dakika bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Sıcaklık dengelendikten sonra cihaz 20 dev/dk. hızda başlatılmış ve 10 dakika süreyle takip edilmiştir. 10. dakika sonunda her 1 dakika aralıklarla üç kez viskozite değeri (cP) okunarak bu üç değerın ortalaması alınmıştır. Karıştırma sıcaklığını belirlemek amacıyla aynı deney 165 °C’de tekrarlanmıştır. Şekil 4.5’te Dönel Viskozimetre deneyinin yapılışı gösterilmiştir.



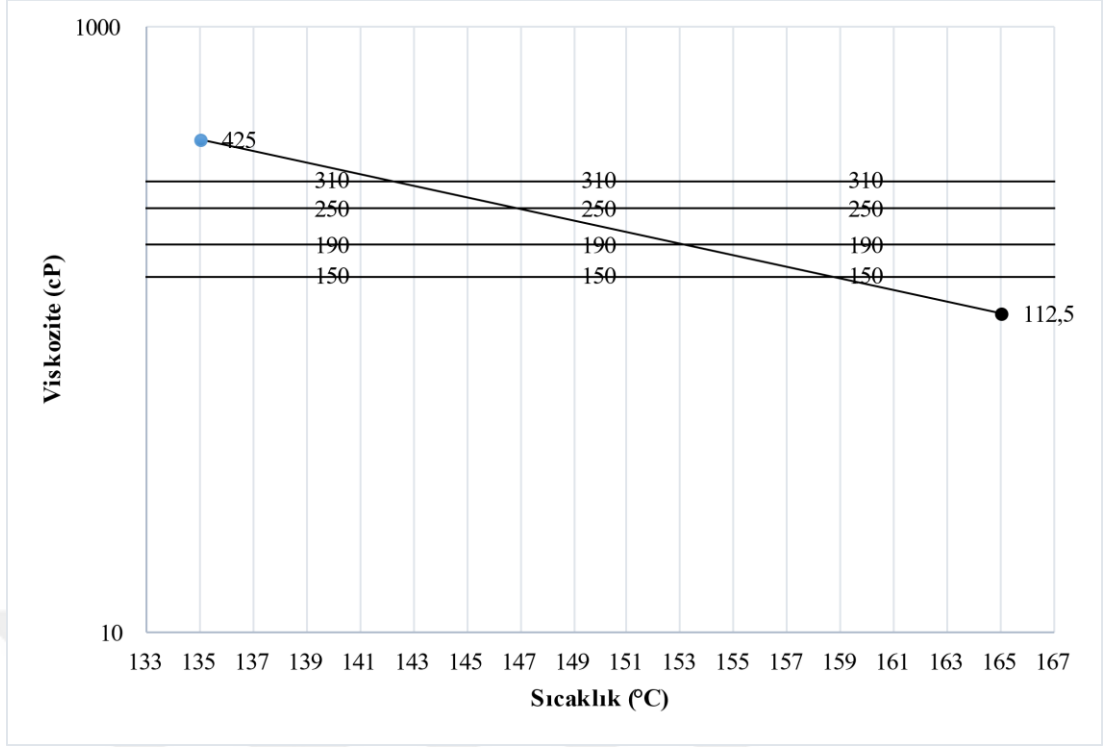
Şekil 4.5. Döney viskozimetre deney aleti

135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda oluşan bitüm viskozimetre değerleri Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Bitüm viskozimetre deney sonucu

Sıcaklık (°C)	Viskozite(cP)
135	425
165	112,5

Viskozite sıcaklık grafiklerine göre karıştırma sıcaklığı tespiti için viskozite değeri 170 ± 20 cP, sıkıştırma sıcaklığı tespiti için ise viskozite değeri 280 ± 30 cP kullanılmış ve karıştırma ile sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir (Öcal vd., 2018).



Şekil 4.6. Viskozite – Sıcaklık Grafiği

Bitüme ait viskozite değerleri ve Şekil 4.6'daki grafikten; karıştırma sıcaklığının 153 °C ve 158 °C aralığında olduğu, sıkıştırma sıcaklığının ise 142 °C ve 147 °C aralığında olduğu görülmektedir. Bu verilere göre deneysel çalışmada karıştırma sıcaklığı 155 °C, sıkıştırma sıcaklığı da 145 °C olarak kullanılmıştır.

4.1.3. Fiber

Fiberler; bitümün süzülerek akmasını engellemek amacıyla TMA karışımlarda kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada Viatop Premium marka pelet formunda üretilmiş olan selülozik fiberler kullanılmıştır. Fiber tedarikçi tavsiyesi doğrultusunda % 0,3 oranında karışıma katılmıştır. Selülozik fibere ait görsel Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Selülozik fiber peletleri

4.1.4. Vermikülit

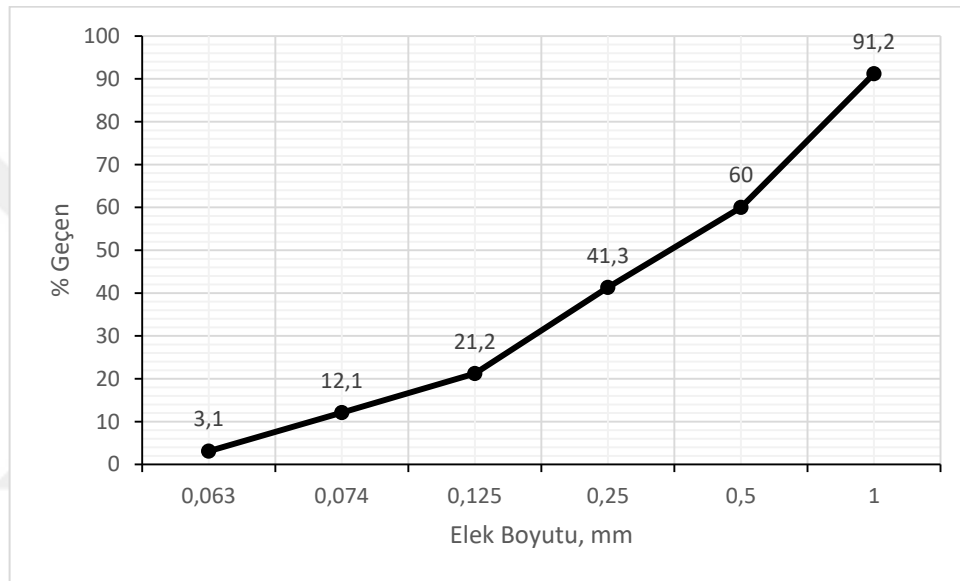
Çalışmada karışım içerisinde fiber yerine katılan diğer bir katkı maddesi ise genleştirilmiş toz halinde vermikülitir. Vermikülit, hidratlı bir magnezyum alüminyum slika mineralidir. Deneysel çalışmada Sivas İli, Yıldızeli İlçesi Demircik Köyü'ndeki vermikülit ocağından çıkarılan genleştirilmiş vermikülit tozu kullanılmıştır. Vermikülit görseli Şekil 4.8'de verilmiştir. Genleştirilmiş vermikülit tozuna ait özellikler sırasıyla Tablo 4.5 ve Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.8. Çalışmada kullanılan genleştirilmiş vermikülit tozu

Tablo 4.5. Genleştirilmiş vermikülit tozu tane boyutu dağılımı

Elek Boyutu, mm	% Geçen
1,0	91,2
0,5	60,00
0,25	41,3
0,125	21,20
0,074	12,1
0,063	3,1



Şekil 4.9. Genleştirilmiş vermikülit tozu tane boyutu dağılımı eğrisi

4.2. Taş Mastik Asfalt Tasarımı ve Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada selülozik fiber yerine vermikülit ilave edilerek hazırlanan karışımların, Marshall stabiliteleri, akma değerleri ve soyulmaya karşı dirençleri belirlenmiştir.

4.2.1. Karışım Tasarımı

Karışım tasarımı Marshall metodu kullanılarak yapılmıştır. Üretilcek numune ağırlığı 1150 gr. olarak hedeflenmiştir. Tasarım numuneleri için her bir oranından 3'er adet olacka şekilde toplamda 15 adet numune üretilmiştir. Karışıma katılacak olan malzemeler KTŞ kriterleri doğrultusunda hazırlanarak yaklaşık 4 saat karıştırma sıcaklığındaki (155 °C) etüvde ısıtılmıştır. Isıtılan agregaya katkı malzemesi olarak fiber üretici firmanın tavsiyesi

ve deneysel çalışmalar sonucunda % 0,3 oranında selülozik fiber eklenmiştir. Isınan agregaya eklenen fiber 1 dakika boyunca karıştırılarak homojen agrega fiber karışımı elde edilmiştir. Karışıma istenen oranlarda bitüm eklenerek 90 saniye tekrar karıştırılmış ve karışım sıkıştırılmaya hazır hale gelmiştir. Hazırlanan karışım sıkıştırma sıcaklığında ısıtılan silindirik numune kaplarına yerleştirilerek Marshall tokmağında her iki yönde 50 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Karıştırma ve sıkıştırma işlemi mümkün olan en kısa sürede tamamlanmıştır. Elde edilen numuneler 30 dakika sonra numune kalıplarından çıkarılarak oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. şekil 4.10'da kalıptan çıkarılan numuneler gösterilmiştir. Tasarım numuneleri üzerinde KTş TMA Tip-1'de belirlenen değerler arasına denk gelen aralıklara göre optimum bitüm oranı tayini yapılmıştır.



şekil 4.10. Kalıptan çıkarılarak 60  C suda bekletilen numuneler

4.2.2. Karışımın Teorik Maksimum zgl Ağırlığının Belirlenmesi

Bu deney ile sıkıştırılmamış olan bitümlü karışımların yoğunluklarını belirlenmesi (G_{mm}) amaçlanmaktadır. Belirlenen yoğunluk, sıkıştırılmış olan bitümlü karışımların hava boşluklarının yüzdesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (AASHTO T 209, 2019).

Karışımın yoğunluğunu belirlemek amacıyla AASHTO T 209 ve ASTM D 2041 deney standartları kullanılmıştır. Standartta belirtilen karışım ağırlığı 1500 g. olarak seçilmiştir. Bitüm oranı % 6,5 olarak seçilmiştir. Karışım 155  C'de karıştırılarak sıkıştırma yapılmadan 110  C'ye kadar soğuması sağlanmıştır. Soğumaya bırakılan karışım el

yormamıyla karışım mümkün olabilecek en küçük parçalara (6.3 mm'den daha küçük) ayrılmıştır (AASHTO T 209, 2019). Şekil 4.11'de parçalara ayrılmış karışım gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Maksimum teorik özgül ağırlık hesabında kullanılan parçalara ayrılmış bitümlü karışım

Deneyde kullanılacak olan behere tespit çizgisine kadar 25 ± 4 °C sıcaklıktaki saf su eklenmiştir. 15 ± 2 dakika boyunca behere vakum uygulanmış, suyun içindeki hava boşaltılmış ve boşalan havanı yerine tespit çizgisine kadar su eklenerek beherdeki suyun ağırlığı belirlenmiştir. Beherdeki su boşaltıldıktan sonra boş beherin darası alınarak içerisine parçalanan karışım eklenerek karışımın kuru ağırlığı belirlenmiştir. Beherin içinde bulunan karışıma, havası alınmış olan su, tespit çizgisine kadar doldurularak 15 ± 2 dakika süreyle tekrar vakum uygulanmıştır. Karışım üzerine uygulanan vakumlama işlemi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Beherde bulunan karışım ve su üzerine vakum uygulanması

Vakum işleminden sonra beher tespit çizgisine kadar tekrar su ile doldurularak tartılmıştır.

Burada;

A : Numunenin kuru ağırlığı

D : Havası alınmış suyun ağırlığı

E : Havası alınmış su-bitümlü karışım ağırlığı olarak ele alındığında;

$G_{mm} = \frac{A}{A+D-E}$ formülü ile teorik maksimum özgül ağırlık hesaplanmıştır (Solaimanian, 2003).

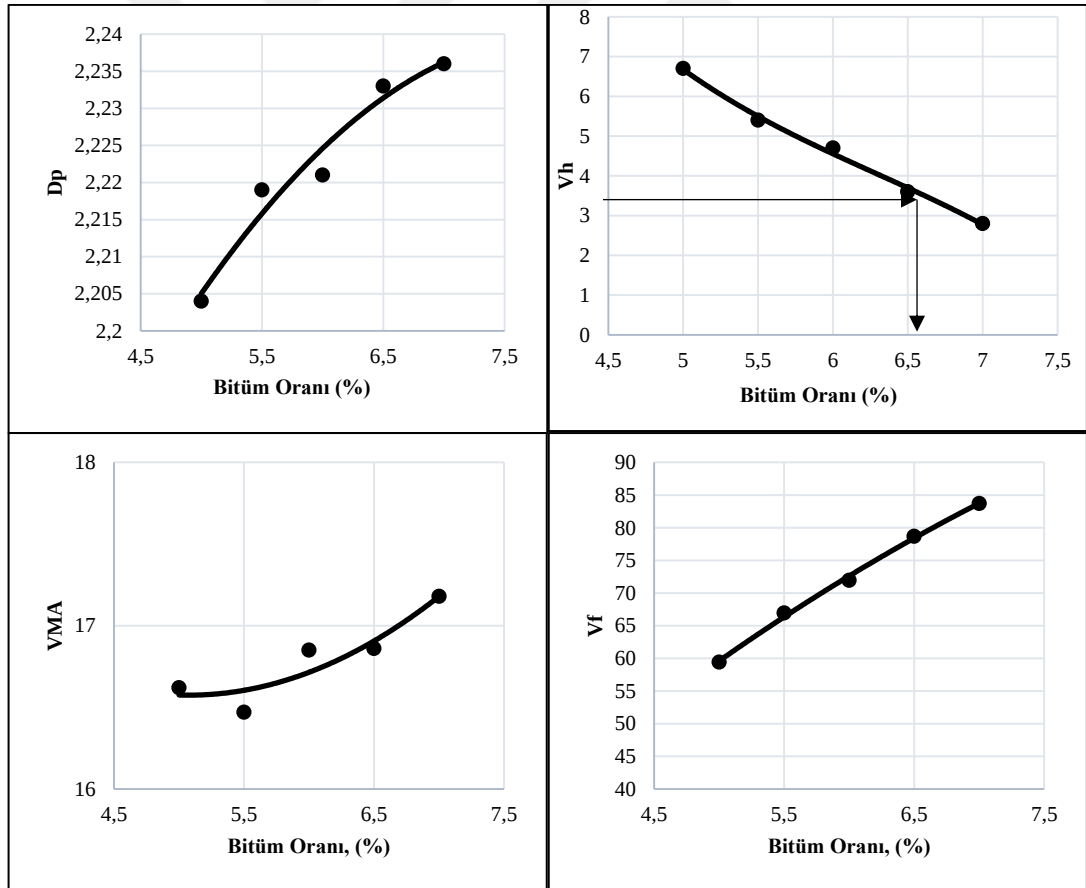
4.2.3. Fiber Katkılı Tasarım Numuneleri Deney Sonuçları

Optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla %5,0 %5,5 %6,0 %6,5 ve %7,0 karışım oranlarında bitüm, % 0,3 oranında selülozik fiber içeren 15 adet numune üretilmiştir. Bu numunelere ait deney sonuçları Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. TMA tasarımı bitüm oranlarına göre deney sonuçları

Karışım Özelliği	Şartname Limitleri TMA Tip-1		Bitüm Oranı				
	Min.	Max.	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Hacimsel Özgöl Ağırlık(Dp-g/cm ³)	-	-	2,204	2,219	2,221	2,233	2,236
Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık(Dt-g/cm ³)	-	-	2,363	2,347	2,331	2,316	2,301
Hava Boşluğu (Vh-%)	2	4	6,7	5,4	4,7	3,6	2,8
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	16	-	16,62	16,47	16,85	16,86	17,18
Asfalt ile Dolu Boşluk Oranı (Vf-%)	-	-	59,40	66,94	71,94	78,68	83,70

Şekil 4.13’de selülozik fiber katkıli tasarım numunelerinin hacimsel özgül ağırlığı , hava boşluk oranları , agregalar arası boşluk ve asfalt ile dolu boşluk oranı verilmiştir.



Şekil 4.13. Tasarım numuneleri deney sonuçları grafiği

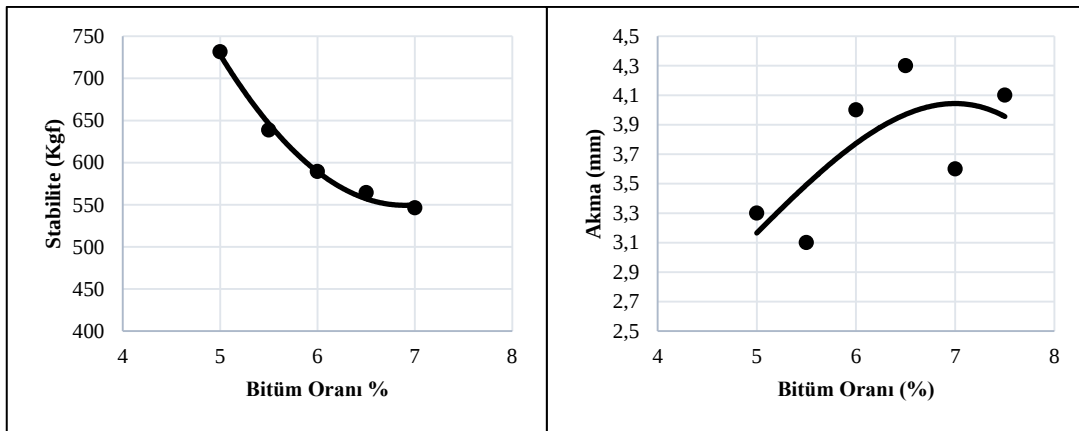
Deney sonuçları neticesinde TMA hava boşluğu limitleri olarak sıcak iklim bölgelerinde kullanılan değerler dikkate alınmış ve %3,5 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı optimum olarak belirlenmiştir. Bu değer %6,6 bitüm oranı olarak hesaplanmıştır. %6,6 bitüm oranı baz alınarak üretilen numunelerin şartname limitlerine uygun olduğu görülmüştür. Şartname limitleri Tablo 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Optimum bitüm oranı ile üretilen numunelerin değerleri ve uygunlukları

Karışım Özelliği	Şartname Limitleri TMA Tip-1		Değer	Uygunluk
	Min.	Max.		
Hacimsel Özgül Ağırlık(Dp-g/cm ³)	-	-	2,234	Uygun
Maksimum Teorik Özgül Ağırlık(Dt-g/cm ³)	-	-	2,313	Uygun
Hava Boşluğu (Vh-%)	3	4	3,4	Uygun
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	16	-	16,92	Uygun
Asfalt ile Dolu Boşluk Oranı (Vf-%)	-	-	79,74	Uygun
Schellenberger (%)		0,3	0,283	Uygun
Bitüm Oranı (%)	5,8	-	6,6	Uygun

4.2.4. Fiber Katkılı Tasarım Numuneleri Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

15 adet tasarım numunesinin Marshall Stabilite deney cihazı yardımıyla stabilitesi ve akma değerleri belirlenmiştir. Numuneler 60 °C suda 30 dakika bekletilmiş ve numune sudan çıkarıldıktan sonraki 30 saniye içerisinde cihaza yerleştirilmiş ve 45 saniye içinde deney tamamlanmıştır. Marshall stabilite ve akma deney sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Tasarım numuneleri stabilite ve akma değerleri grafiği

Marshall stabilite deney sonuçlarına göre bitüm oranının artmasıyla beraber numunelerinin stabilite değerlerinin de azaldığı görülmektedir.

4.3. Vermikülit Kullanılarak Üretilen Numunelerin Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmada vermicülit ile üretilecek numunelerde vermicülit oranı tayini için; selülozik fiber kullanılarak üretilen tasarım numunelerinin optimum bitüm oranı olan % 6,6'ya göre Schellenberger Süzülme Deneyi vermicülit katkılı olarak uygulanmıştır.

4.3.1. % 6,6 Bitüm Oranı İçin Schellenberger Süzülme Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmada vermicülit katkısının kaplamaya etkisinin araştırılması için 12 adet Schellenberger Süzülme Deneyi yapılmıştır. Çalışmada üretilen vermicülit katkılı TMA için vermicülit oranı tayini KTŞ'ye uygun olarak Schellenberger Süzülme deney sonucunda bulunan akma değerine uygun olarak yapılmıştır. KTŞ'de Schellenberger deney sonucu maksimum % 0,3 olması şartı vardır. Optimum bitüm oranı % 6,6 için karışıma % 0,1, % 0,2, % 0,3, % 0,4, % 0,5, % 0,6, % 0,65, % 0,7, % 0,8, % 0,9, % 1 ve %2 oranında vermicülit katkısı ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.8'de %6,6 optimum bitüm oranı ile hazırlanan karışımlarda KTŞ'ye göre Schellenberger deney sonucunun maksimum % 0,3 olduğu değere en yakın sonuç olarak vermicülit katkısının % 0,65 olduğu oran seçilmiştir.

Tablo 4.8. Schellenberger süzülme deneyi sonuçları

Vermikülit Oran(%)	Sonuç (%)
0,1	2,03
0,2	1,96
0,3	1,32
0,4	1,02
0,5	0,77
0,6	0,33
0,65	0,29
0,7	0,14
0,8	0,091
0,9	0,040
1	0,040
2	0,020

4.3.2. Fiber ve Vermikülit Katkılı Numunelerin Schellenberger Deneyi Sonuçlarının Kıyaslanması

Selülozik fiber ve vermikülit katkılı numunelerin Schellenberger süzülme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Fiber ve vermikülit katkılı numunelerin % 6,6 bitüm oranı için schellenberger deneyi sonuçları

Oran (%)	Selülozik Fiber	Vermikülit
	%	
0	0,28	0,28
0,1	2,25	2,03
0,2	1,38	1,96
0,3	0,28	1,32
0,4	0,26	1,02
0,5	0,28	0,77
0,6		0,33
0,65		0,29
0,7		0,14
0,8		0,091
0,9		0,040
1		0,040
2		0,020

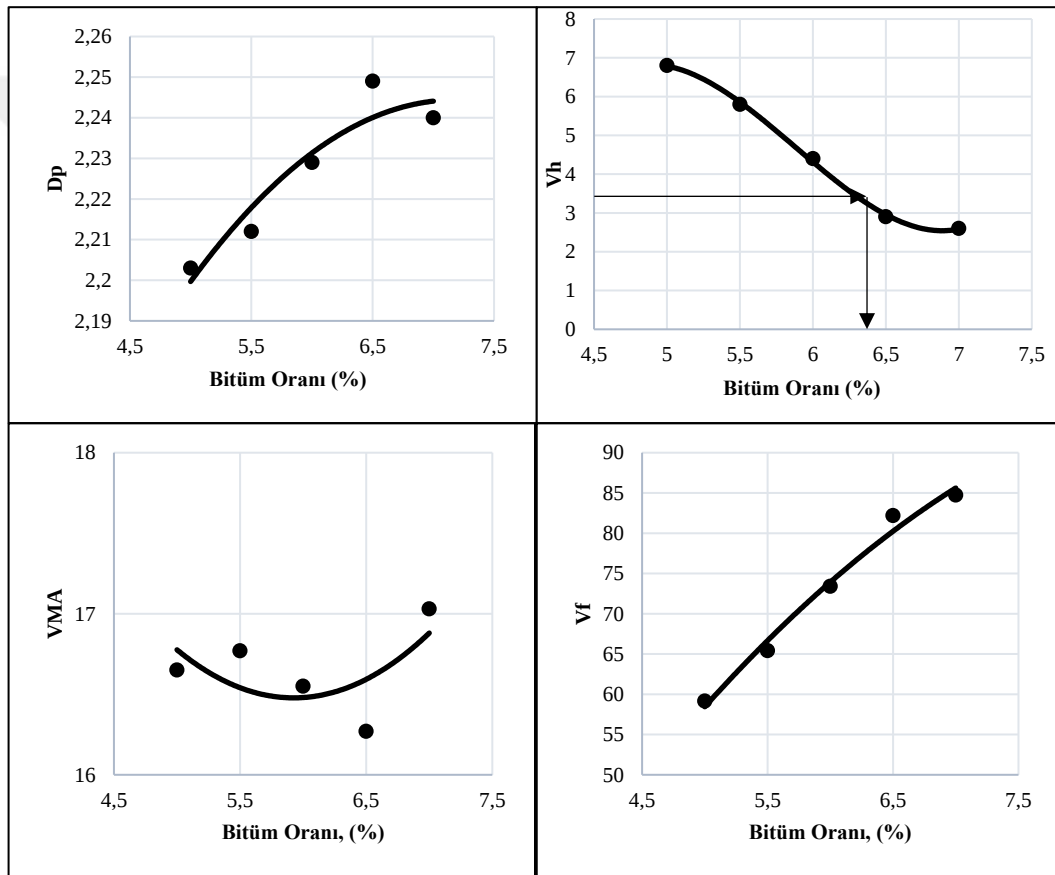
Tablo 4.10’a göre % 0,1 oranında vermikülit kullanımında fiber kullanımına kıyasla süzülmenin yaklaşık % 10 oranında daha iyi olduğu ve katkısız karışımla kıyasladığında ise vermikülitin katkısız karışımlara göre daha iyi süzülme oranı azalttığı görülmüştür. KTŞ’ye göre Schellenberger deney sonucunun maksimum % 0,3 olduğu değere en yakın sonuç vermikülit katkısında % 0,65, fiber katkısında ise % 0,3 oranında bulunmuştur. Fiber katkılı karışımda % 0,3 ve daha yüksek oranlarda fiber kullanımının değerleri fazla değiştirmedikleri tespit edilirken; vermikülit katkılı karışımlarda % 0,65 ve daha yüksek oranlarda vermikülit kullanımıyla süzülme oranının daha da düştüğü tespit edilmiştir.

4.3.3. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Deney Sonuçları

Optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla %5,0 %5,5 %6,0 %6,5 ve %7,0 karışım oranlarında bitüm ve Schellenberger deneyiyle bulunan % 0,65 oranında vermikülit içeren 15 adet numune üretilmiştir. Bu numunelere ait deney sonuçları Tablo 4.10’da gösterilmiştir.

Tablo 4.10. TMA tasarımı bitüm oranlarına göre deney sonuçları

Karışım Özelliği	Şartname Limitleri TMA Tip-1		Bitüm Oranı				
	Min.	Max.	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Hacimsel Özgöl Ağırlık(Dp-g/cm ³)	-	-	2,203	2,212	2,229	2,249	2,240
Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık(Dt-g/cm ³)	-	-	2,363	2,347	2,331	2,316	2,301
Hava Boşluğu (Vh-%)	2	4	6,8	5,8	4,4	2,9	2,6
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	16	-	16,65	16,77	16,55	16,27	17,03
Asfalt ile Dolu Boşluk Oranı (Vf-%)	-	-	59,16	65,41	73,41	82,18	84,73



Şekil 4.15. Tasarım numuneleri deney sonuçları grafiği

Şekil 4.15’de vermikülit katkılı tasarım numunelerinin hacimsel özgül ağırlığı, hava boşluk oranları , agregalar arası boşluk ve asfalt ile dolu boşluk oranı verilmiştir.

Deney sonuçları neticesinde TMA hava boşluğu limitleri (%3-4 arası) olarak sıcak iklim bölgelerinde kullanılan değerler dikkate alınmış ve % 3,5 hava boşluğuna karşılık gelen % 6,4 bitüm oranı optimum olarak belirlenmiştir. %6,4 bitüm oranı baz alınarak

üretileen numunelerin şartname limitlerine uygun olduğu görülmüştür. Şartname limitleri Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. Optimum bitüm oranı ile üretileen numunelerin değeri ve uygunlukları

Karışım Özelliği	Şartname Limitleri TMA Tip-1		Değer	Uygunluk
	Min.	Max.		
Hacimsel Özgöl Ağırlık(Dp-g/cm ³)	-	-	2,235	Uygun
Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık(Dt-g/cm ³)	-	-	2,319	Uygun
Hava Boşluğu (Vh-%)	3	4	3,6	Uygun
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	16	-	16,70	Uygun
Asfalt ile Dolu Boşluk Oranı (Vf-%)	-	-	78,44	Uygun
Schellenberger (%)		0,3	0,294	Uygun
Bitüm Oranı (%)	5,8	-	6,4	Uygun

4.3.4. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Schellenberger Deney Sonuçları

Optimum bitüm oranı % 6,4 karışımına % 0,1, % 0,2, % 0,3, % 0,4, % 0,5, % 0,6, % 0,65, % 0,7, % 0,8, % 0,9 ve % 1 oranında vermiükülit katkısı ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler Tablo 4.12’de verilmiştir.

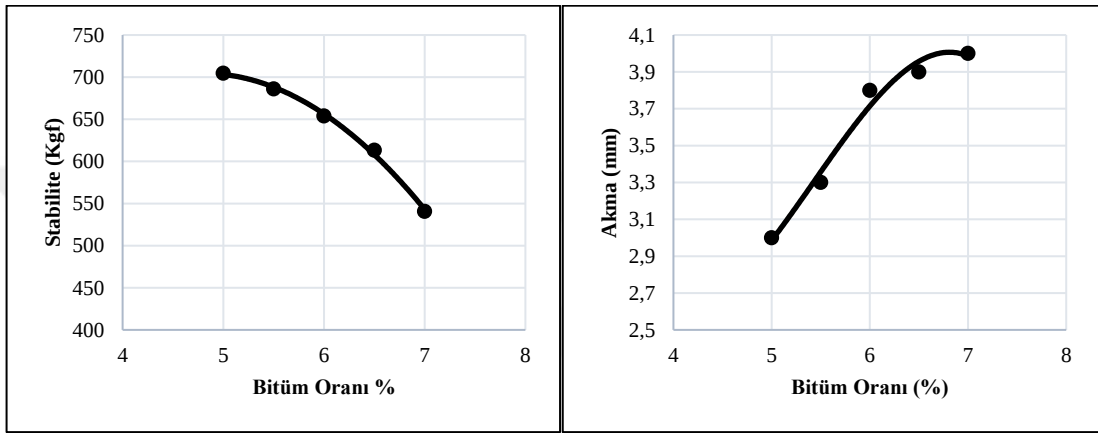
Tablo 4.12. % 6,4 Bitüm oranıyla yapılan schellenberger deney sonucu

Vermikülit Oranı (%)	Sonuç (%)
0,1	3,95
0,2	3,72
0,3	3,12
0,4	1,96
0,5	1,29
0,6	0,48
0,65	0,29
0,7	0,12
0,8	0,11
0,9	0,051
1	0,020

Bu deney sonucundan da görüldüğü gibi vermiükülit katkısının % 0,65 olduğu orana göre tasarım numuneler üretilmesi uygundur.

4.3.5. Vermikülit Katkılı Tasarım Numuneleri Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

15 adet tasarım numunesinin Marshall Stabilite deney cihazı yardımıyla stabilitesi ve akma değerleri belirlenmiştir. Numuneler 60 °C suda 30 dakika bekletilmiş ve numune sudan çıkarıldıktan sonraki 30 saniye içerisinde cihaza yerleştirilmiş ve 45 saniye içinde deney tamamlanmıştır. Marshall stabilite ve akma deney sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Tasarım numuneleri stabilite ve akma değerleri grafiği

Marshall stabilite deney sonuçlarına göre bitüm oranının artmasıyla beraber numunelerinin stabilite değerlerinin de azaldığı görülmektedir.

4.3.6. Selülozik Fiber ve Vermikülit ile Üretilen Karışımların Neme Karşı Hassasiyetlerinin Belirlenmesi (AASHTO T-283 Deneyi)

Bitümlü karışımların neme karşı hassasiyetini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi olarak AASHTO T-283 deneyi kullanılmaktadır (AASHTO T 283,2013).

Deneyisel çalışmada AASHTO T 283 şartnamesine uygun olarak % 6,4 bitüm oranlı ve % 0,65 vermikülit katkılı 12 adet numune ile % 6,6 bitüm oranlı ve % 0,3 selülozik fiber katkılı 12 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin 6'sar adetleri koşullandırılmış numuneler iken 6'sar adetleri ise koşullandırılmamış numunelerden oluşmaktadır.

4.3.6.1. AASHTO T 283 Deneyi İçin Numunelerin Hava Boşluğunun Belirlenmesi

AASHTO T 283 şartnamesine göre numunelerin hava boşluk oranlarının $\% 7 \pm 1$ olması gerekmektedir. İstenen hava boşluğuna sahip numuneler Marshall tokmağında darbe sayısı değiştirilerek üretilmiştir. Daha önce üretimi yapılan tasarım numunelerinin hava boşluk oranları yaklaşık $\% 3,5$ olduğu düşünüldüğünde darbe sayısının azaltılmasıyla istenen hava boşluğu oranı elde edilecektir. Hazırlanan karışımlara 30, 20 ve 15 darbe ile sıkıştırılarak hava boşlukları belirlenmiştir. Yapılan tasarım deneyi sonucunda 20 darbe ile sıkıştırılan 3 numunenin hava boşluk oranları $\% 6,94$, $\% 6,68$ ve $\% 6,43$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla neme karşı hassasiyetleri belirlenecek olan numuneler, her iki yüzüne de 20'şer darbe vurulacak şekilde hazırlanmıştır.

4.3.6.2. AASHTO T 283 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneyisel çalışmada karışımlar 1150 gr olarak hazırlanmıştır. Fiber katkılı karışım için ağırlıkça $\% 6,6$ bitüm ve $\% 0,3$ fiber katılarak, vermikülit katkılı karışım için ise ağırlıkça $\% 6,4$ bitüm ve $\% 0,65$ vermikülit katılarak karışımlar üretilmiştir. Bitüm ve agrega $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 4 saat etüvde bekletilmiştir. Katkıları katılarak ile hazırlanan numuneler 30 cm çapında tavalara konularak 2 ± 0.5 saat oda sıcaklığında soğuması için bekletilmiştir. Oda sıcaklığına soğuyan numuneler $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 16 saat küre tabi tutulmuştur. Kür işleminin ardından, numuneler 2 saat boyunca sıkıştırma sıcaklığı olan $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ de etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler sıkıştırma sıcaklığından düşmeden hemen Marshall kalıplarına alınarak her iki yüzüne yağlı kağıt konulmuş ve Marshall tokmağında her iki yüzüne 20'şer darbe olacak şekilde vurularak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler kalıplardan kriko yardımıyla çıkarılarak oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir (AASHTO T 283, 2013).

Hazırlanmış olan numuneler koşullandırılmış vermikülit katkılı, koşullandırılmamış vermikülit katkılı, koşullandırılmış fiber katkılı ve koşullandırılmamış fiber katkılı numuneler olarak ayrılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler üzerine 24 saat sonra hava boşluğu tayini yapılarak dolaylı çekme testi şartnamelerine uygun olarak uygulanacaktır. Koşullandırılacak olan numuneler ise şartname şartlarına göre doygun hale getirildikten sonra donma-çözünme döngüsüne tabi tutulacaktır.

4.3.6.3. Koşullandırılmamış Deney Numuneleri Üzerinde Dolaylı Çekme Testinin Uygulanması

6 adet %6,6 bitüm ve % 0,3 fiber katkılı numune ile % 6,4 bitüm ve % 0,65 vermikülit katkılı kuru numuneler, 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Hava boşluk oranları alınan numuneler 25 °C'lik su banyosunda 2 saat bekletilerek dolaylı çekme testi uygulanmıştır. Dolaylı çekme testi uygulanan numunelerin deney sonuçları Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.13. Fiber katkılı kuru numunelere uygulanan dolaylı çekme deney sonuçları

Numune		1	2	3	4	5	6
Çap, mm	D	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Kalınlık, mm	t	66,5	67,8	67,4	66,5	67,2	66,8
Kuru Ağırlık, g	A	1116,2	1112,6	1112,9	1113,9	1115,6	1115,7
Suya Doygun Ağırlık, g	B	1126,5	1128,5	1129,1	1125,1	1128,6	1127,7
Sudaki Ağırlık, g	C	609,6	608,7	611,6	608,1	609,5	608,9
Hacim (B-C), cm ³	E	516,9	519,8	517,5	517,0	519,1	518,8
Hacimsel Özgül Ağırlık (A/E)	G _{mb}	2,159	2,140	2,151	2,155	2,149	2,151
Teorik Maksimum Özgül Ağırlık	G _{mm}	2,313	2,313	2,313	2,313	2,313	2,313
Hava Boşluğu[100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}], %	P _a	6,63	7,47	7,02	6,66	7,08	7,02
Hava Boşluğu Hacmi (P _a E/100), cm ³	V _a	34,27	38,83	36,33	34,43	36,75	36,42
Yükleme, N	P	6295,87	6080,12	7296,15	7609,96	6903,88	7001,95
Kuru Yüklem [2000P/πtD], kpa	S ₁	0,584	0,564	0,682	0,707	0,646	0,651

Tablo 4.14. Vermikülit katkılı kuru numunelere uygulanan dolaylı çekme deney sonuçları

Numune		1	2	3	4	5	6
Çap, mm	D	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Kalınlık, mm	t	66,2	67,3	66,3	66,8	67,2	66,9
Kuru Ağırlık, g	A	1127,8	1125,6	1128,3	1132,7	1134,5	1134,9
Suya Doygun Ağırlık, g	B	1135,3	1134,0	1136,2	1135,9	1144,7	1141,0
Sudaki Ağırlık, g	C	611,1	612,2	610,4	606,6	618,5	612,0
Hacim (B-C), cm ³	E	524,2	521,8	525,8	529,3	526,2	529,0
Hacimsel Özgül Ağırlık (A/E)	G _{mb}	2,151	2,157	2,149	2,140	2,156	2,145
Teorik Maksimum Özgül Ağırlık	G _{mm}	2,319	2,319	2,319	2,319	2,319	2,319
Hava Boşluğu[100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}], %	P _a	7,20	6,98	7,47	7,72	7,03	7,49
Hava Boşluğu Hacmi (P _a E/100), cm ³	V _a	37,74	36,42	39,28	40,86	36,99	39,62
Yükleme, N	P	9296,70	7864,93	8963,28	7590,35	8159,13	9296,70
Kuru Yüklem [2000P/πtD], kpa	S ₁	0,869	0,731	0,838	0,704	0,759	0,863

4.3.6.4. Koşullandırılacak AASHTO T 283 Deney Numunelerinin Doygun Hale Getirilmesi

AASHTO T 283 şartnamesine göre koşullandırılacak olan numuneler % 70 - % 80 arasında doymun hale getirilmesi gerekmektedir. Numuneler doymun hale getirilmeden hava boşluğu tayini yapılmıştır. Doymun hale getirilecek olan numuneler şartnameye uygun olarak

vakum kabına konulmuş ve üzerlerini 25 mm geçecek şekilde 25 °C su ile doldurularak vakum kabına yerleştirilmiştir. Vakum kabının kapağı sızdırmazlığı önlenecek şekilde kapatılmıştır. Vakum pompası ile 15-67 kPa arasında vakumlama işlemi 5 dakika boyunca uygulanmıştır. Vakumlama süresi dolan numune 25 °C sıcaklıkta bulunan su banyosunda 5 dakika boyunca bekletilmiştir. Vakum işlemi ile doymun hale getirilen numunelerin doymunluk dereceleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S^i = 100 \times J^i / V_a \quad (4.1)$$

$$J^i = B^i - A \quad (4.2)$$

$$V_a = P_a \times E / 100 \quad (4.3)$$

$$E = B - C \quad (4.4)$$

$$P_a = [100 \times (G_{mm} - G_{mb}) / G_{mm}] \quad (4.5)$$

S^i = Numune doymunluk oranı

V_a = Numune hava boşluğu hacmi

J^i = Numunenin suya doymun ağırlığı

A = Numunenin kuru ağırlığı

B^i = Numune doymun haldeki sudaki ağırlığı

P_a = Kuru numune hava boşluk oranı

B = Numunenin suya doymun ağırlığı

C = Numunenin sudaki ağırlığı

E = Numunenin suya doymun ağırlığından sudaki ağırlığının çıkarılmış ağırlığı

Doymunluk derecesi % 70 - % 80 aralığında olmayan numuneler deneyde kullanılmamaktadır. Tablo 4.15 ve Tablo 4.16’da vakum işlemi uygulandıktan sonra doymun hale getirilen vermikülit ve fiber katkıli numunelerin doymunluk dereceleri verilmektedir.

Tablo 4.15. Vermikülit katkıli numunelerin doymunluk derecesi

Numune		1	2	3	4	5	6
Suya Doymun Ağırlık, g	B	1142,1	1140,3	1129,3	1138,0	1139,1	1137,1
Sudaki Ağırlık, g	C	619,3	617,8	612,2	616,3	617,3	613,0
Hacim (B-C), cm ³	E	522,8	522,5	517,10	521,70	521,80	524,10
Hava Boşluğu[100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}], %	P _a	6,64	6,93	6,68	6,85	7,12	6,63
Hava Boşluğu Hacmi (P _a E/100), cm ³	V _a	34,71	36,21	34,54	35,74	37,15	34,75
Saturated							
Emilen Su Hacmi(B ⁱ -A), cm ³	J ⁱ	27,10	28,70	25,90	25,50	27,40	26,40
Doymunluk (100J ⁱ / V _a) %	S ⁱ	78,08	79,26	74,98	71,35	73,76	75,97

Tablo 4.16. Fiber katkılı numunelerin doygunluk derecesi

Numune		1	2	3	4	5	6
SSD Mass, g	B	1126,1	1125,4	1124,1	1127,0	1132,1	1132,6
Mass in Water, g	C	609,3	608,3	607,5	611,1	613,3	613,9
Volume (B-C), cm ³	E	516,8	517,10	516,60	516,80	518,80	518,70
% Air Voids[100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}]	P _a	7,00	6,85	6,78	6,60	6,66	6,71
Volume of Air Voids(P _a E/100), cm ³	V _a	36,17	35,42	35,03	34,11	34,55	34,80
Saturated							
Emilen Su Hacmi(B'-A), cm ³	J'	27,50	26,80	26,40	25,90	25,70	25,20
Doygunluk (100J'/ V _a) %	S'	76,03	75,66	75,36	75,93	74,38	72,41

4.3.6.5. Koşullandırılacak Numunelere Donma-Çözünme Döngüsünün Uygulanması

Koşullandırılmış numunelerden %70- %80 arasında doygun hale getirilen numuneler streç film ile tamamen kaplanmıştır. Donma-çözünme döngüsüne tabi tutulacak olan numuneler içinde 10 ml su bulunan plastik kaplara konulmuştur. Kapların ağzı kapatılarak donma-çözünme döngüsüne geçilmiştir. Plastik kaplarda bulunan numuneler – 18 °C derecede bulunan dondurucuda 16 saat süreyle bekletilmiştir. 16 saat süreyle yapılan donma işleminden sonra çözünme işlemine geçilmiştir. Dondurulan numuneler, çözünme işlemi için dondurucudan ve plastik kaplardan çıkarılarak 60 °C'lik su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Numuneler su banyosuna yerleştirildikten hemen sonra streç film numunelerden uzaklaştırılmıştır. 24 saatin sonunda numuneler 25 °C su içerisinde 2 saat bekletilmiştir. Su banyosunun 25 °C üzerine çıkmasını engellemek su banyosuna buz katılmıştır. Süre sonunda su banyosundan çıkarılarak çekme testine geçilecek numunelerin kalınlığı t' belirlenmiştir.

4.3.6.6. AASHTO T 283 Deney Numuneleri Üzerinde Dolaylı Çekme Testinin Uygulanması

Fiber ve vermikülit katkılı numunelerin hava boşluk oranları alınmış, numuneler %70 - % 80 doygun hale getirilerek donma-çözünme döngüsüne tabi tutulmuşlardır. Numunelere dolaylı çekme testi uygulanmış ve Tablo 4.17 ve Tablo 4.18'de deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.17. Fiber katkılı koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme deney sonuçları

Numune		1	2	3	4	5	6	Ort.	S.Sapma
Çap, mm	D	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	-
Kalınlık, mm	t	67,5	67,5	67,0	67,4	67,0	67,4	67,3	0,2366
Kuru Ağırlık, g	A	1111,6	1114,0	1113,8	1114,7	1120,0	1119,4	1115,8	3,3588
Suya Doygun Ağırlık, g	B	1126,1	1125,4	1124,1	1127,0	1132,1	1132,6	1127,88	3,5907
Sudaki Ağırlık, g	C	609,3	608,3	607,5	611,1	613,3	613,9	610,57	2,6463
Hacim (B-C), cm ³	E	516,8	517,1	516,6	516,8	518,8	518,7	517,47	1,0073
Hacimsel Özgül Ağırlık (A/E)	G _{mb}	2,151	2,156	2,159	2,161	2,158	2,154	2,1565	0,0036
Teorik Max. Özgül Ağırlık	G _{mm}	2,313	2,313	2,313	2,313	2,313	2,313	2,313	-
Hava Boşluğu [100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}], %	P _a	7,00	6,85	6,78	6,60	6,66	6,71	6,77	0,1442
Hava Boşluğu Hacmi (P _a E/100), cm ³	V _a	36,17	35,42	35,03	34,11	34,55	34,80	35,18	0,7052
Yükleme, N	P	6295,87	6080,12	7296,15	7609,96	6903,88	7001,95	6864,66	583,278
Doyurulmuş									
Kalınlık, mm	t'	67,4	67,2	66,6	67,3	67,0	67,4	67,15	0,3082
Suya Doygun Ağırlık, g	B'	1139,1	1140,8	1140,2	1140,6	1145,7	1144,6	1141,83	2,6583
Emilen Su Hacmi (B'-A), cm ³	J'	27,50	26,80	26,40	25,90	25,70	25,20	26,25	0,8264
Doygunluk (100J'/V _a), %	S'	76,03	75,66	75,36	75,93	74,38	72,41	74,96	1,3838
Yükleme, N(Ibf)	P'	6040,90	5825,15	6550,84	7237,31	6609,68	6393,94	6442,97	493,187
Kuru Yüklem, kpa	S ₁	0,584	0,564	0,682	0,707	0,646	0,651	0,639	0,553
Doygun Yüklem, kpa	S ₂	0,561	0,543	0,616	0,674	0,618	0,594	0,601	0,0466
İÇM (S ₂ /S ₁)		0,94			0,94				

Tablo 4.18. Vermikülit katkılı koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme deney sonuçları

Numune		1	2	3	4	5	6	Ort.	S.Sapma
Çap, mm	D	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	-
Kalınlık, mm	t	67,0	67,4	67,0	67,5	67,4	67,5	67,3	0,2366
Kuru Ağırlık, g	A	1131,7	1127,7	1119,0	1126,9	1124,3	1122,2	1125,3	4,4627
Suya Doygun Ağırlık, g	B	1142,1	1140,3	1129,3	1138,0	1139,1	1137,1	1137,65	4,4514
Sudaki Ağırlık, g	C	619,3	617,8	612,2	616,3	617,3	613,0	615,98	2,8053
Hacim (B-C), cm ³	E	522,8	522,5	517,1	521,7	521,8	524,1	521,67	2,3989
Hacimsel Özgül Ağırlık (A/E)	G _{mb}	2,165	2,158	2,141	2,160	2,155	2,164	2,157	0,0088
Teorik Max. Özgül Ağırlık	G _{mm}	2,319	2,319	2,319	2,319	2,319	2,319	2,319	-
Hava Boşluğu [100(G _{mm} -G _{mb})/G _{mm}], %	P _a	6,64	6,93	6,68	6,85	7,12	6,63	6,81	0,1781
Hava Boşluğu Hacmi (P _a E/100), cm ³	V _a	34,71	36,21	34,54	35,74	37,15	34,75	35,52	0,9479
Yükleme, N	P	9296,70	7864,93	8963,28	7590,35	8159,13	9296,70	8528,52	751,822
Doyurulmuş									
Kalınlık, mm	t'	67,0	67,0	67,0	67,4	67,3	67,4	67,18	0,2041
Suya Doygun Ağırlık, g	B'	1158,8	1156,4	1144,9	1152,4	1151,7	1148,6	1152,13	5,0540
Emilen Su Hacmi (B'-A), cm ³	J'	27,10	28,70	25,90	25,50	27,40	26,40	26,83	1,1587
Doygunluk (100J'/V _a), %	S'	78,08	79,26	74,98	71,35	73,76	75,97	75,57	2,8813
Yükleme, N	P'	7198,08	6138,96	6511,62	6943,11	6158,58	5825,15	6462,58	524,926
Kuru Yüklem, kpa	S ₁	0,869	0,731	0,838	0,704	0,759	0,863	0,794	0,0716
Doygun Yüklem, kpa	S ₂	0,673	0,574	0,608	0,645	0,573	0,545	0,603	0,0486
İÇM (S ₂ /S ₁)		0,76			0,76				

KTŞ'ye göre deneyin sonucunda numunelerin;

$$(İÇM) = \frac{s_2}{s_1} \geq 0,80 \text{ oranını sağlaması gerekmektedir.}$$

Ancak TMA karışımları AASHTO M 325'e göre;

$$(İÇM) = \frac{s_2}{s_1} \geq 0,70 \text{ oranını sağlaması yeterli olmaktadır.}$$

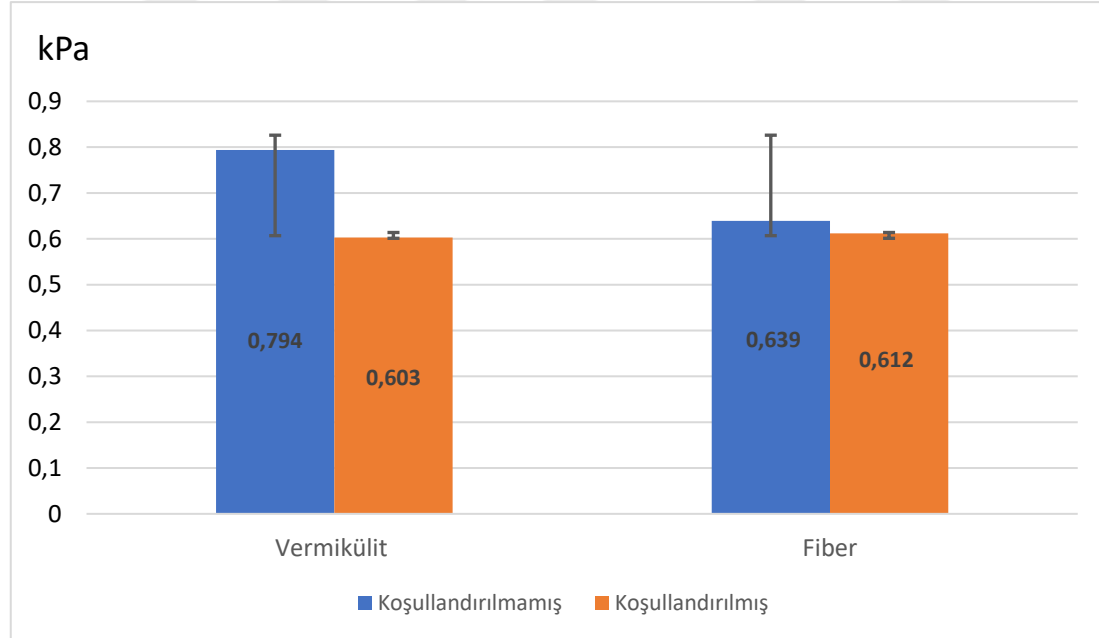
Burada

S₁; Koşullandırılmamış numunelerin ortalama dolaylı çekme gerilmesi.

S₂; Koşullandırılmış numunelerin ortalama dolaylı çekme gerilmesi.

4.3.6.7. AASHTO T 283'e Göre Koşullandırılmış ve Koşullandırılmamış Deney Numunelerinin Dolaylı Çekme Testi Sonuçlarının Kıyaslanması

Tablo 4.19. AASHTO T 283'e göre dolaylı çekme testi sonuçları



Tablo 4.19'da verilen sonuçlara göre çekme gerilmesi testi sonucunda koşullandırılmamış haldeki numunelerde ortalama çekme gerilmesi değeri vermikülit katkılı TMA karışımlarda elde edilmiştir. Koşullandırılmış numunelerin çekme gerilmesi değerleri kıyaslandığında fiber katkılı karışımların (6 numune ort. 0,612) ve vermikülit katkılı

karışımların (6 numune ort. 0,603) değerlerinin yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Ancak koşullandırılmış numunelerin, koşullandırılmamış numunelere olan çekme gerilmeleri oranı sonucunda, fiber katkılı numunelerin değerinin İÇM değeri 0,94 iken, vermikülit katkılı numunelerin İÇM değeri 0,76 elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre fiber katkılı TMA karışımlarının vermikülit katkılı TMA karışımlara göre neme karşı dirençlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.7. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Petri kaplarında bulunan numunelere gözle yapılan inceleme sonucunda soyulmamış yüzey oranlarının tüm yüzeye oranı olarak vermikülit katkılı karışımda %70 iken, fiber katkılı karışımda bu oran %50 olarak gözlemlenmiştir. Şekil 4.17’de Petri kabı içersinde bulunan numuneler ve soyulmaları verilmiştir.



Şekil 4.17. Petri kabında bulunan numuneler ve soyulmaları

4.3.8. Maliyet Analizi

Deneyisel çalışmada kullanılan malzemelerin oranları ve fiyatları değerlendirildiğinde ise;

Viatop Premium marka selülozik fiberin fiyatı KDV Dahil 826,00 €/ton’dur. Güncel kur ile KDV Dahil 8590,40 TL yapmaktadır. Yerli selülozik fiber dezavantajları nedeniyle karşılaştırılmamıştır.

Genleştirilmiş ve toz haline getirilmiş vermikülit fiyatı KDV Dahil 3186,00 TL/ton’dur.

Vermikülit katkısının % 0,65 ve selülozik fiber katkısının % 0,3 oranlarında olduğu göz önüne alındığında, vermikülit katkısının selülozik fiber katkısına oranla %20 daha ucuz olduğu görölmektedir. Selülozik fiber malzemesinin yurtdışı menşeiili olduğu ve vermikülitin ölkemiz içerisinde üretiminin yapıldığı düşünöldüğünde; vermikülitin kullanılması ölk ekonomisine katkı sağlayacaktır.



5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada öncelikle TMA karışımında optimum bitüm oranını belirlemek için % 5,0, % 5,5, % 6,0, %6,5, %7,0 oranlarında bitüm ve tedarikçi firmanın tavsiyesi doğrultusunda % 0,3 oranında selülozik fiber katkısı kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Üretilen TMA numunelerinin deney sonuçlarına göre optimum bitüm oranı % 6,6 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm oranına uygun olarak tasarım numuneleri üretilmiştir.

Süzülme deneyinde bitüm oranı olarak; selülozik fiber katkılı numunelerin optimum bitüm oranı olan % 6,6 seçilerek deney yapılmıştır. Deney numunelerine % 0,1, % 0,2, % 0,3, % 0,4, % 0,5, % 0,6, % 0,65, % 0,7, % 0,8, % 0,9, % 1 ve %2 oranlı vermikülit ilavesiyle Schellenberger Süzülme deneyi yapılmıştır. Bu deney sonucunda numunelere % 0,65 oranında vermikülit ilavesi % 0,29 süzülmeyi sağlamıştır. KTŞ'ye göre Schellenberger Süzülme Deneyinin maksimum % 0,3 olması gerekmekte olup deney sonuçları şartname limitlerine uymaktadır.

Vermikülit katkılı TMA karışımlarda optimum bitüm oranını belirlemek için % 5,0, % 5,5, % 6,0, %6,5, %7,0 oranlarında bitüm ve % 0,65 oranında vermikülit katkısı kullanarak karışımlar hazırlanmıştır. Üretilen TMA numunelerinin deney sonuçlarına göre optimum bitüm oranı % 6,4 olarak belirlenmiştir. Bulunan optimum bitüm oranında göre Schellenberger Süzülme Deneyi % 0,1, % 0,2, % 0,3, % 0,4, % 0,5, % 0,6, % 0,65, % 0,7, % 0,8, % 0,9, ve % 1 oranları için tekrar uygulanmıştır. Bu deney sonucunda numunelere % 0,65 oranında vermikülit ilavesi % 0,29 süzülmeyi sağlamış olup bu değer şartname kriterini sağlamaktadır.

Selülozik fiber yerine vermikülit kullanımı ile TMA'nın dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi ve soyulmaya karşı direncini araştırdığımız bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Selülozik fiber ve vermikülit katkılı numuneler üzerine süzülme etkisini belirlemek amacıyla Schellenberger Süzülme deneyleri yapılmıştır. % 0,1 oranında vermikülit kullanımında fiber kullanımına kıyasla süzülmenin yaklaşık % 10 oranında daha iyi olduğu ve katkısız karışımla kıyasladığında ise vermikülitin katkısız karışımlara göre süzülmeyi daha çok azalttığı görülmüştür. KTŞ'ye göre Schellenberger deney sonucunun maksimum % 0,3 olduğu değere en yakın sonuç vermikülit katkısında %

0,65, fiber katkısında ise % 0,3 oranında bulunmuştur. Fiber katkılı karışımda % 0,3 ve daha yüksek oranlarda fiber kullanımının değerleri fazla değiştirmedığı tespit edilirken; vermikülit katkılı karışımlarda % 0,65 ve daha yüksek oranlarda vermikülit kullanımıyla süzülme oranının daha da düştüğü tespit edilmiştir.

2. Koşullandırılmamış olan selülozik fiber ve vermikülit katkılı numunelerin Marshall Stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Vermikülit katkılı tasarım numunelerinin Marshall stabilite değerleri % 10 oranında daha yüksek çıkmıştır.
3. Koşullandırılmamış % 6,6 bitüm oranlı ve % 0,65 vermikülit katkılı tasarım numunesi ile % 6,4 bitüm oranlı ve % 0,3 selülozik fiber katkılı tasarım numunelerinin çekme dayanımını belirlemek için dolaylı çekme deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre vermikülit katkılı numuneler selülozik fiber katkılı numunelere göre % 25 daha iyi çekme dayanımı göstermiştir (Anderson ve ark., 2003). Dolaylı çekme dayanımı, laboratuvar ortamında bitümlü karışımlarda tekerlek izi oluşumunu tahmin etmekte kullanılan bir göstergedir. TMA'ya vermikülit ilavesiyle çatlaklara ve tekerlek izi oluşumuna karşı direnç daha yüksek olabileceği dolaylı çekme dayanımı deneyinin sonucuyla gösterilmiştir.
4. Koşullandırılmış % 6,6 bitüm oranlı ve % 0,65 vermikülit katkılı tasarım numunesi ile % 6,4 bitüm oranlı ve % 0,3 selülozik fiber katkılı tasarım numunelerine AASHTO T 283 deneyi için önce vakum işlemi uygulanmış ve numuneler % 70 - % 80 doygun hale getirilmiştir. Doygun hale getirilen numuneler donma-çözünme döngüsüne tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin deney sonuçlarına göre koşullandırılmış tasarım numunelerinin dolaylı çekme deneyi vermikülit katkılı numunede 6462,58 N ve selülozik fiber katkılı numune de 6442,97 N olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla iki farklı katkılı numunelerin dolaylı çekme deney sonuçlarının yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.
5. İndirekt çekme mukavemeti oranı (İÇM) değerlerine bakıldığında fiber katkılı numunelerin ortalamasının 0,94, vermikülit katkılı numunelerin ortalamasının ise 0,76 bulunmuştur. Dolayısıyla dolaylı çekme deneyinde doygun yükleme/kuru yükleme kıyaslandığında selülozik fiber katkılı numunelerin vermikülit katkılı numunelere göre neme karşı hassasiyetinin daha iyi olduğu görülmüştür. AASHTO M 325 şartnamesinde TMA kaplamalar için nem hassasiyetinin minimum % 70

olması gerekmektedir. Her iki katkılı numunelerin de bu şartı sağladığı görülmektedir.

6. Selülozik fiber katkılı numuneler ve vermikülit katkılı numunelere Nicholson soyulma deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda vermikülit katkılı numunelerin soyulmamış yüzey oranlarının tüm yüzeye oranı %70 iken; selülozik fiber katkılı numunelerde % 50 olduğu görülmüştür. Vermikülit katkılı numunelerin selülozik fiber katkılı numunelere kıyasla soyulmaya karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, vermikülit içeren TMA karışımlar üzerine laboratuvar ortamında dolaylı çekme, süzülme ve soyulma deneyleri uygulanmıştır. Daha sonraki çalışmalarda, vermikülit içeren TMA karışımlar üzerine tekerlek izi direnci ve yorulma çatlakları deneyleri yapılarak karışımın performansı daha iyi belirlenebilecektir.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 84, (2012). Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO T 85, (2014). Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO T 209, (2019). Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO T 283, (2013). Resistance Of Compacted Asphalt Mixtures To Moisture-Induced Damage, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Akpolat M., (2014). Ilık Karışım Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Altan, F., (2018). Taş Mastik Asfaltta Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Doğal Agregası İle Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul, 97s. - Transportation Research Laboratory, 314 no.lu Rapor.
- Anderson, R. M., Christensen, D. W., Bonaquist, R., Ş., (2003). Estimating The Rutting Potential of Asphalt Mixtures Using Superpave Gyratory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength (with discussion), Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Chicago 72s.
- Aslan, Ş., (2017). Endüstriyel Atıkların Yol Üstyapı Tabakalarında ve Dolgularında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Kayseri, 153s.
- Arslan, İ., (2020). Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Doğa Kenevir Lifinin Selülozik Fiber Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Bozok Üniversitesi, Yozgat.
- ASTM C 127, (2001). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM C 128, (2018). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM D 2041, Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

- Atmaca, M., Çorbacıoğlu, Ş., (1998). Yapı Malzemeleri El Kitabı 2. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Aydın, F., Oral, M., (2019). Türkiye’de Karayolu Ulaşımının Tarihsel Gelişimi, Journal of Awareness, 3(5), 257-266.
- Biröl, Ç., Serap, B., Serap, S., (2011) Türkiye’de Karayollarının Gelişimine Tarihsel Bir Bakış, Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, 1(1), 123-150.
- Blazejowski, K., (2011). Stone Matrix Asphalt “Theory and Practice”, Second Edition, Taylor and Francis Group, Newyork.
- Brown, E., R., Cooley, Jr. L., A., (1999). Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements, Report No. 425, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Brown, E. R., Mallick, R. B., Haddock, J.E., Bukowski, J., (1997). Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States, NLA Report.
- Busching, H.W., Elliott, E.H., Reyneveld, N.G., (1970) “A State-of-the-Art Survey of Reinforced Asphalt Paving,” Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, pp. 766–798.
- Button, J. W., Epps, J. A., (1981). Mechanical Characterization of Fiber-reinforced Bituminous Concrete, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, Report, 4061-1.
- Campbell, C., (1999). The Use of Stone Mastic Asphalt on Aircraft Pavements, School of Engineering and Technology, Melbourne, Final Report.
- Dolares M, (2006). Chemical And Structural Evolution Of Metamorphic Vermiculite. Spain Vol. 44, Pp. 249-265.
- DPT: 2617 - ÖİK: 628, (2001) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu, Ankara.
- Dündar, G. (1998). Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- EAPA, (1998). “Heavy Duty Surfaces”; Çevirmen: Temren, Z., (2005). Ağır Yüklere Maruz Üstyapılar/Taş Mastik Asfalt-SMA, ASMÜD Yayınları, Ankara.
- Eker, A., N., (2019). Bazalt Ve Gabroların Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi, Batman Üniversitesi, Batman.
- Ekinci, C.E. ve Yeniboğanlı, A., (1995). Silis Dumanlı Betonlarda Sürtünme Yolu ile Aşınma Kaybı, İnşaat Mühendisliğindeki gelişmeler 2. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, İstanbul, sayfa 359-368.

- EN 13108-5, (2006). Bituminous Mixtures -Material Specifications, Part 5: Stone Mastic Asphalt, Cen/Cenelec, Brussel.
- Erseçen, S., (1992). Dünya'da ve Türkiye'de Vermiculite : MTA Genel Müdürlüğü Yayinlari, s. 19.
- Evans, A.M., (1993). Ore Geology and Industrial Minerals : An Introduction. 3rd Ed. Blackwell Scientific Publications, London, Edinburg, s. 390, Boston.
- Fitzgerald, R. L., (2000). Novel Applications of Carbon Fiber Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-carbon Pre-forms, Master's thesis, Michigan Technological University.
- Freeman, R. D., Burati, J. L., Amirkhanian, S. N., Bridges, W. C., (1989). Polyester Fibers in Asphalt Paving Mixtures. In Association of Asphalt Paving Technologists Proc (Vol. 58).
- Güngör, A. G., (2009). Taş Mastik Asfalt Bilgilendirme Semineri. Ankara.
- Hamburg, A.G., (1985). Long Term Experience with Split Mastic Asphalt in the Federal Republic of Germany, Euro Bitumen Symposium.
- Han, S., Graf, K. And Kohl, A., (2009). Taş Mastik Asfalt/Uzun Ömürlü Yapılar, 5. Asfalt Sempozyumu, S. 40-49.
- Harris, B. M., Stuart, K. D., (1995). “Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt”, Association of Asphalt Paving Technologists, U.S.A., 64(1): 44-46
- Harben, P. W., Kuzvart, M., (1996). Industrial Minerals, Global Geology Ind. Mins. Inf. Ltd. Metal Bulletin, 462p., London.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., (2001), “Asfalt ve Uygulamaları”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, s. 22-27.
- İnternet: <http://www.enotes.com/how-products-encyclopedia/vermiculite>, Mayıs 2011.
- İnternet: Taş Mastik Asfalt, İstanbul Asfalt A.Ş. <https://isfalt.istanbul/urunler/tas-mastik-asfalt> , 2020.
- İnternet: UAB, (2021). Ulaşan ve Gelişen Türkiye 2020, Bakanlık Yayınları, <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/ulasan-ve-erisen-turkiye-2020.pdf>.
- İnternet: <http://www.vermiculite.org/Properties6.php>, Mayıs 2011.
- İzol, E., (2020). Taş Mastik Asfalt Yapımında Mineral Filler Olarak Mermer Tozunun Kullanılması, (Yüksek Lisans Tezi), Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.

- KGM, (2008). Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- KGM, (2007). İç genelge No:2007/95.
- KGM, (2000). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı El Kitabı. Ankara, 198s.
- KTŞ., Karayolları Teknik Şartnamesi, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 860 s.
- Kutluhan, S., Açar, E., (2009) Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Faktörler ve Azaltmaya Yönelik Öneriler, İTÜ Dergisi, İTÜ, İstanbul 8(6) , s. 179-191.
- Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, (2007) Dokuzuncu Kalkınma Planı, Ankara.
- Orhan, F., (2006). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Öcal, A., Gürü, M., Karacasu, M., (2018). Improvement of Bitumen Performance Properties With Nano Magnesium Spinel and Colemanite. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(3), 939-951.
- Önal A.M., Kahramangil, M., (1993). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Özcanan, S., Akpınar, M.V., (2014), Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, İMO Teknik Dergi, Yazı 413, 6625-6654.
- NAPA, (1999) Designing and Constructing SMA Mixtures- State-of-the-Practice; Quality Improvement Series:122, Maryland.
- Peltonen, P., (1991). Wear and Deformation Characteristics of Fibre Reinforced Asphalt Pavements. Construction and Building Materials, 5(1), 18-22.
- Saedi, S., (2019). Polimerik Katkıların (Frp, Viatop Premium ve SBS) Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, (Doktora Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 186s.
- Sağlık A., Güngör, A.G., (2008). Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Scherocman, J. A., (1993). “Mix Design, Production and Placement and Compaction of Stone Mastic Asphalt Pavements”, Annual Meeting of the American Association, USA, 1-16
- Scherocman, J.A. (1992). Construction of Stone Mastic Asphalt Test Sections in the U.S.A.

- Serfass, J. P., Samanos, J., (1996). Fiber-modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior. Asphalt Paving Technology, 65, 193-230.
- Singer, A., Stoffer, P. (1981). Hydrothermal Vermiculite from the Atlantis II Deep, Red Sea. Clays and Clay Minerals, 29(6), pp 454-458.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., Tandon, V., (2003). Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements, Moisture Sensitivity of Asphalt (National Seminar), USA.
- Sönmez, İ., (2009). Taş Mastik Asfalt Bilgilendirme Semineri. Ankara.
- Sönmez, İ., Taştan, Y., Yıldız, K., Bayraklı, Y., (2018), İki Asfalt Tabakası Arasında Geogrid Kullanımının Asfalt Performansına Olan Etkisi, İsfalt, İstanbul
- Strand, P. R., (1983). Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J., Vol: 2.
- Tayfur S., (2001). Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamalar İçin Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi, (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 236 s.
- Temren, Z., (2009). Taş Mastik Asfalt Dizaynı, Üretimi ve Uygulamaları. Türkiye Asfalt Mütahhitleri Derneği, Ankara, 35 s.
- Toksoy, F., (1997). Vermikülit : Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye’deki Durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir, Türkiye.
- Tunç, A., (2001). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Birinci Baskı, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Tunç, A., (2004). Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Birinci Baskı, Asil Yayın, Ankara.
- Tuğlu, H. ve Kazankıran, H., (2004). “Ülkemizde Uygulanan Aşınma Tabakası Şartnameleri, Problemler ve İlk Yaygın SMA Uygulaması”, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 25-26 Kasım 2004, Ankara, 49-69.
- TS EN 1097, (2013). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler.
- Umar, F., Açar, E., (1991). Yol üstyapısı, İTÜ, İstanbul
- Verstraeten, J., (1995). Bituminous Materials With A High Resistance To Flow Rutting, PIARC Technical Committee On Flexible Roads, Belgium.
- Weisman, J., (2010). <http://webmineral.com>, Photographic Guide to Mineral Species.
- Weller, R., (2010). Cochise College, Cochise Country, Arizona, <http://skywalker.cochise.edu>

- Yamanlar, A., Ç., (2012). Farklı Kaplama Türlerinin Yüzey Doku Özelliklerinin İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yardım, M. S., Arslan, F., (2013). Türkiye’de Taş Mastik Asfalt Kaplama Kullanımı ve Literatür Üzerine Bir Değerlendirme, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.
- Yayla, N., (2011). Karayolu Mühendisliği, Birsan Yayınevi, ISBN: 975-511-287-1, İstanbul.
- Zhang , H., Xu, H., Wang, X., Yu, J. (2013). Microstructures And Thermal Aging Mechanism Of Expanded Vermiculite Modified Bitumen. Construction And Building Materials, 47, 919–926.
- Zhang, H., Jia, X., Yu, J., Xue, L., (2013). Effect of Expanded Vermiculite on Microstructures and Aging Properties of Styrene–Butadiene–Styrene Copolymer Modified Bitumen, 40, 224-230.
- Zhang, H. B., Zhang, H. L., Ke, N. X., Huang, J. H., Zhu, C.Z., (2015). The Effect Of Different Nanomaterials on The Long-Term Aging Properties of Bitumen, Petroleum Science and Technology, 33(4), 388-396.
- Zhang H. L., Ke, N. X., Zhu, C. Z. (2015). Long-Term Aging Properties of Bitumen with Expanded Vermiculite and Different Inorganic Nanoparticles, Petroleum Science and Technology, 33 (17-18), 1557-1562.