

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**VERMİKÜLİTİN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARI
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Fahriye UYSAL

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet SALTAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



© 2016 [Fahriye UYSAL]

TEZ ONAYI

Fahriye UYSAL tarafından hazırlanan "Vermikülitin Karayolu Esnek Üstyapıları Bitümlü Sıcak Karışımlarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Mehmet SALTAN
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Serdal TERZİ
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Yasin TUNCER

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Fahriye UYSAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VERMİKÜLİTİN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARI BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Fahriye UYSAL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Dünyada yol talebinin artması gelecek için hammadde kaygısına yol açmaktadır. Bu nedenle esnek üstyapının ömrünü uzatarak tasarruf etme veya bitümlü sıcak karışım (BSK) yapımında tasarruf amaçlı bitümü azaltarak ya da agrega yerine alternatif diğer doğal malzemeler kullanarak bu kaygıya çözüm aranmaktadır. Bu amaçla çalışmada bitümlü sıcak karışımlarda agrega kullanımını veya bitüm kullanımını azaltmak amacı ile ülkemizde madeni bulunan trioktahedral mika minerali olarak bilinen vermikülitin esnek üstyapılarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada geliştirilmiş vermikülit bitüme katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada Marshall stabilite deneyi ile optimum bitüm hesaplanmış ve optimum vermikülit katkılı BSK belirlenmiştir. Marshall stabilite sonuçlarına göre belirlenen modifiye bitüme çekip-çıkarma deneyi, vialit ve indirekt çekme deneyleri yapılmıştır. Çalışmada %9 , %13 , %14 katkılı geliştirilmiş vermikülit modifikasyonlarının Marshall stabilite değerini artırdığı görülmektedir. İndirekt çekme deney sonucunda geliştirilmiş vermikülit modifikasyonunun TSR değeri %81 bulunmuştur. İndirekt çekme deney sonucuna göre geliştirilmiş vermikülitin bitüm modifiyeri olarak kullanılabilirliği ve vermikülit katkılı BSK'nın neme karşı dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Geliştirilmiş vermikülit katkılı bitüme vialit ve çekip-çıkarma (Pull out) deneyleri uygulandığında, vermikülitin bitüm-agrega yapışmasına önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda geliştirilmiş vermikülitin bitüm modifiyeri olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vermikülit, geliştirilmiş vermikülit, bitüm modifikasyonu, Marshall Stabilite, vialit, indirekt çekme mukavemeti, Pull-Out, BSK.

2016, 45 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

RESEARCH OF VERMICULITE USABILITY FOR HOT MIX ASPHALT IN HIGHWAY FLEXIBLE PAVEMENTS

Fahriye UYSAL

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

The world's growing demand for roads has led to concerns of the raw materials for the future. Therefore, to save the life cycle by extending the flexible pavement or reducing savings for bitumen production in hot-mix asphalt, instead of using aggregates, the alternative natural materials are seeking for the triacthedual mica mineral known as vermiculite in availability of flexible pavements were investigated. In this study, the expanded vermiculite was used as a bitumen additive. In this study, optimum bitumen was calculated with Marshall Stability experiment and optimum vermiculite modified bitumen was designated. According to the Marshall Stability outcome designated modified bitumen pull out experiment were done in this study, it is observed that Marshall Stability value increased by %9-%13-%14 solid expansion vermiculite modifications as a result of in direct pull out experiment, TSR value of expansion vermiculite modification was found as %81. It was seen that the bitumen aggregate adhesion vermiculite has no significant effect then expanded vermiculite added growth vialit and pull out tests are conducted. As a result of experiments, it was determined that the expanded vermiculite can be used in modified bitumen.

Keywords: Vermiculite, expanded vermiculite (EV), modification of the bitumen, Marshall Stability, vialit, indirect tensile strength, Pull-Out, Hot Mix Asphalt.

2016, 45 pages

TEŐEKKÜR

Bu alıŐma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İŐnfaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalıŐmasını sürdürdüğüm dönemde, bana daima destek olan, çalışma disiplini aŐılayan, tavsiye, eleŐtiri ve düzenlemeleriyle çalışmanın içerik ve sunumundaki zenginliğine büyük katkıda bulunan, sayĐı değer danışman hocam, Sayın **Prof. Dr. Mehmet SALTAN**'a sonsuz teŐekkür ve minnettarlığımı sunarım.

Laboratuvar çalıŐmalarımnda bana ulaştırma laboratuvarının kapılarını açan ve yardımcı olan değerli hocalarım Prof. Dr. Serdal TERZİ'ye, ArŐ. Gör. Őebnem KARAHANER'e, ArŐ. Gör. Ekinhan ERİŐKİN'e ve Uzm. Buket ÇAPALI'ya, çalıŐmalarımnda yardımlarını esirgemeyen arkadaŐım ArŐ. Gör. Ali Nadi KAPLAN'a, İŐŐ. Müh. Onur SARIOĞLU ve İŐŐ. Müh. Akten CENGİZHAN'a sonsuz teŐekkür ederim.

Tezimin her aŐamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve sayĐılarımı sunarım.

Fahriye UYSAL
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Vialit Deney Aleti	12
Şekil 3.2. Çekip-Çıkarma Deney Aleti	15
Şekil 3.3. Çekip-Çıkarma Deneyi Aşamaları	15
Şekil 3.4. Marshall Stabilite Deney Aleti	18
Şekil 3.5. Marshall Stabilite Deney Tokmağı	19
Şekil 3.6. İndirekt Çekme Deney Aşamaları	23
Şekil 4.1. Karışımın Stabilite Bitüm İlişkisi	24
Şekil 4.2. Karışımın Birim Ağırlık Bitüm İlişkisi	25
Şekil 4.3. Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi Bitüm İlişkisi	25
Şekil 4.4. Karışımdaki Boşluk Hacmi Bitüm İlişkisi	26
Şekil 4.5. Marshall Stabilite Değerleri	28
Şekil 4.6. Akma Değerleri	29
Şekil 4.7. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi değerleri	29
Şekil 4.8. Toplam Hacmin Yüzdesi Olarak Sıkıştırılmış Karışımdaki Agrega boşluğu değerleri	30
Şekil 4.9. Mineral Agregada İçerisindeki Boşluk Oranı Değerleri	31
Şekil 4.10. Teorik Özgül Ağırlık Değerleri	31
Şekil 4.11. Sıkıştırılmış Karışımın Pratik Özgül Ağırlık Değerleri	32
Şekil 4.12. ITSKURU ve ITSISLAK deney sonuçları	33
Şekil 4.13. TSR deney sonuçları	34
Şekil 4.14. Çekip-Çıkarma Deney Sonuçları Grafiği	36
Şekil 4.15. Vermikülit SEM Görüntüleri	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. TÜPRAŞ Rafinerilerinde Bitüm üretimi (Tupras, 2016).....	2
Çizelge 3.1. Kireçtaşı agrega özellikleri	8
Çizelge 3.2. Bitüm özellikleri	9
Çizelge 3.3. Çeşitli vermikülitlerin kimyasal bileşimleri.....	10
Çizelge 4.1. Vermikülit çalışma matrisi.....	27
Çizelge 4.2. Marshall stabilite ve akma sonuçları.....	28
Çizelge 4.3. İndirekt çekme için vermikülit matrisi.....	33
Çizelge 4.4. Vialit Deney Sonuçları.....	34
Çizelge 4.5. Çekip-çıkarma (Pull-Out) deney sonuçları	35



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Deney ve Malzeme Kurumu)
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
cm	santimetre
cm ²	santimetrekare
CR	Parça Kauçuk
CTAB	Setiltrimetil Amonyum Bromür
dk	Dakika
dm ³	Desimetreküp
DSR	Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
DT	Karışımın maksimum özgül ağırlığı
EVA	Etil-Vinil-Asetat
ER	Epoksi Reçine
G*	Kompleks kayma modülü
GPa	Gigapascal
gr	Gram
ITS	Indirect Tensile Strength (İndirekt Çekme Mukavemeti)
in	inç
kg	kilogram
Kg/m ³	kilogram/metreküp
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
kN	kilonewton
kN/cm ³	kilonewton/santimetre küp
mm	milimetre
MPa	Megapascal
M.T.A	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
OEÇFB	Organik Esaslı Sentetik Çinkofosfat Bileşiği
OBDA	Oktadesil Dimetil Benzil Amonyum Klorür
PAV	Pressure aging vessel (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
PG	Penetrasyon Derecesi
SBS	Styrene-Butadien-Styrene
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
sn	saniye
TSR	Tensile Strength Ratio (Çekme Mukavemeti Oranı)
TÜPRAŞ	Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.
Vf	Asfaltla dolu boşluk
VFA	Asfaltla dolu boşluk yüzdesi
Vh	Karışımındaki agrega boşluğu
VMA	Agregalar arası boşluk yüzdesi
Wa	Agreganın ağırlıkça yüzdesi
ZDDF	Çinko Dialkyl Dithio Fosfat
%	Yüzde
°C	Santigrad derece

1. GİRİŞ

Yol üstyapısının her bir tabakasinda kullanılan malzemeler, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından önemlidir. Yol üstyapısı bağlayıcı cinsine göre esnek ve rijit üstyapı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Ülkemizde en çok kullanılan üstyapı cinsi esnek üstyapılardır. Esnek üstyapı, yüklerinin büyük bir kısmının üstyapıyı oluşturan bitümlü bağlayıcılı ya da bağlayıcısız tabakalar tarafından taşındığı, kalan kısmın tabana aktarıldığı üstyapı tipidir. Stabilitesi; agreganın kenetlenmesine, dane sürtünmesine ve kohezyona bağlıdır (Orhan, 2012). Esnek üstyapı belirli özelliklere sahip malzemelerden oluşmuş bir seri tabakayı içerir. Esnek üstyapı kaplama, temel ve alt temel olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Kaplama tabakasinda asfalt betonu; asfalt çimentosu ve agreganın karışımından oluşan bitümlü sıcak karışım kullanılır. Agregaların kurutulması ve iyi bir karıştırma ve işlenebilirlik için ısıtılması, asfalt çimentosunun ise uygun bir akıcılığa gelmesi amacıyla ısıtılmasından sonra, agreganın ve bitümün bir tesiste karıştırılması ile hazırlanan karışımlara bitümlü sıcak karışım (BSK) denilmektedir (Orhan, 2012). Bitümlü sıcak karışımlarda ağırlıkça %4-8 oranında bitüm, %92-96 oranında agreganın kullanılmaktadır. BSK'ların performansını artırmak ve uzun süre yüksek seviyede performans göstermesini sağlamak amacıyla BSK'larda değişik modifiye edici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleri iyileştirme amaçlı bitüme ve agregaya ilave olarak kullanılabilir.

Ülkemizde asfalt endüstrisinde kullanılan bitüm, Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TÜPRAŞ)'a aittir. TÜPRAŞ, asfalt kaplamalarda kullanılmak üzere farklı penetrasyon değerlerinde bitüm üretir. %10'u yerli ham petrol olmak üzere ortalama yılda 20 milyon ton civarında ham petrol işleyen TÜPRAŞ rafinerileri, özellikle bitüm üretimine yönelik olarak tasarlanmış rafineriler değildir (TAER, 2006).

TÜPRAŞ rafinerilerinde son 4 yılda üretilen toplam bitüm miktarı Çizelge 1.1'de verilmiştir (Tupras, 2016).

Çizelge 1.1. TÜPRAŞ Rafinerilerinde Bitüm üretimi (Tupras, 2016)

Yıl	2012 (*1000 ton)	2013 (*1000 ton)	2014 (*1000 ton)	2015 (*1000 ton)
Üretim	2810	2924	1920	2876

Ulaşım sektörü hammadde kullanımının yoğun olduğu bir sektördür (Akbulut vd., 2003). Dünyada artan nüfus ile birlikte yol talebi de artmaktadır. Artan yol talebi gelecek için hammadde kaygısına yol açmaktadır. Bu durum bize onarımcı çevre politikaları düşünmemiz gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle esnek üstyapının ömrünü uzatarak tasarruf etme veya BSK yapımında tasarruf amaçlı bitümü azaltarak ya da agrega yerine alternatif diğer doğal malzemeler kullanarak bu kaygıya çözüm aranmaktadır. Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi bitüm kullanımı fazladır ve üstyapıda bitüm kullanımını azaltmak önemli ekonomik katkı sağlayacaktır.

Dünyada birçok ülke rezervlerini kullanma ve bu rezervler için kullanım alanları yaratma bakımından oldukça gelişmiştir. Ülkemizde de vermikülit ve bunun gibi birçok rezervin olduğu bilinmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında bitümlü sıcak karışımlarda agrega kullanımını veya bitüm kullanımını azaltmak amacı ile ülkemizde madeni bulunan trioktahedral mika minerali olarak bilinen vermikülitin esnek üstyapılarda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Yapılan ön çalışmalarda vermikülitin agregaya katkı malzemesi olarak kullanımı araştırılmış ve iyi sonuç alınamaması sebebi ile vermikülitin bitüme katkı malzemesi olarak kullanımı üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada, Marshall stabilite deneyi ile optimum bitüm hesaplanmış ve optimum vermikülit modifiyeli bitüm miktarı belirlenmiştir. Marshall stabilite sonuçlarına göre belirlenen modifiye bitüme çekip-çıkarma deneyi, vialit ve indirekt çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geliştirilmiş vermikülitin bitüm modifiyeri olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Esnek üstyapı kaplamalarında oluklanma, çatlama, çabuk yaşlanma, düşük ve yüksek sıcaklıkta bozulma gibi nedenleri önlemek veya geciktirmek amaçlı değişik modifiye edici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu başlıkta litratürde çalışılmış BSK'lara ilave edilen katkı maddeleri kronolojik sıraya göre verilmiştir.

Çelik (2001), çalışmasında, lastikle modifiye edilmiş bitümlü asfalt betonunun yorulma davranışının laboratuvar özelliklerini incelemiş ve parçalanmış otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bağlayıcının asfalt betonunun yorulma davranışına etkisini değerlendirmiştir. Çalışmalarında 50 ve 100 penetrasyon dereceli bitüm kullanmıştır. İlave olarak, parçalanmış otomobil lastiği ile %2 ve %5 oranlarında modifiye edilmiş bitümün asfalt betonunun yorulma özelliklerine etkisini incelemiştir. Otomobil lastiği ile modifikasyon, asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde artırdığını belirlemiştir. %5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat artırırken 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucu yorulma süresinin 23 kat arttığını gözlemiştir.

Navarro vd. (2002), çalışmalarında 60/70 penetrasyonlu bitüm, üç farklı oranda (ağırlıkça %1, %3 ve %7) SBS modifiye bitüm ve toz halinde aynı oranda (ağırlıkça %9) 5 farklı çapta (0.1, 0.29, 0.35, 0.63 ve 0.74mm) araç lastiği modifiye bitüm kullanmıştır. SBS ve araç lastiği modifiyeli bitümlerin modifiye edilmemiş bitüme göre daha iyi viskoelastik özellik gösterdiğini belirtmiştir. Araç lastiği modifiyeli bitümün düşük sıcaklıklarda %3 SBS modifiye bitüm ile benzer özellik göstererek çatlama riskini azaltacağını, yüksek sıcaklıklarda %7 SBS modifiye bitüm ile benzer özellik göstererek tekerlek izi oluşumunu azaltacağını söylemiştir.

Airey (2003), çalışmasında, SBS ile birlikte elastomer katkılı bitüm modifikasyonunu araştırmıştır. Modifiye bitümlere penetrasyon yumuşama noktası, Fraas kırılma noktası, Dinamik Mekanik Analiz (DMA) ve Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) uygulamıştır. Polimer modifikasyonların bitümün bağlayıcılığını artırdığını söylemiştir. SBS ile birlikte polimer modifikasyonunun bitümün elastikiyetini ve rijitliğini artırdığını belirtmiştir.

Gonzales vd. (2004), 60/70 penetrasyon dereceli bitüme aynı oranda (%1, %3) geri dönüştürülmüş etil-vinil-asetat (EVA) ve saf etil-vinil-asetat (EVA) ilave etmiştir. Geri dönüştürülmüş (EVA) ve saf (EVA)'nın bitümün viskoelastikliğini geliştirdiği görülmüştür. Bu modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda çatlama riskini azaltmakta olduğunu belirtmiştir.

Ouyang vd. (2006), 600gr bitüme ağırlıkça %1 çinko dialkyl dithio fosfat (ZDDP) ilave ederek bu modifiye bitümün Thin Film Oven Testiyle (TFOT) yaşlanma direncini değerlendirmiş ve ZDDF eklenen bitümün oksitlenmeyi geciktirerek yaşlanma direncini geliştirdiğini belirtmiştir.

Ahmedzade ve Yılmaz (2007-a), çalışmalarında, 70/100, 100/150 ve 160/220 penetrasyon dereceli 3 farklı bitüm kullanmış ve bu bitümlere SBS katkı maddesini %1,5 oranında artırarak modifiye bitümler ele etmiştir. Bu numunelere Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney (RTFOT) yöntemi ile yaşlandırma işlemi yapmış ve yaşlandırma işlemi sonucunda bütün bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde artma, penetrasyon değerlerinde ise azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Çalışmalarda yaşlandırma işlemi nedeniyle saf bağlayıcılarda meydana gelen kütle kayıplarının ilave edilen SBS oranı artıktıkça azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak modifiye bağlayıcılardaki SBS içeriğini artırmanın kalıcı penetrasyon oranını artıracakı söylenmiştir.

Ahmedzade vd. (2007-b), çalışmalarında, B70/100 sınıfı bitüme epoksi reçinenin etkilerini belirlemek amacıyla dört farklı oranda (%0.75 - %1.0 - %2.0 ve %3.0) epoksi reçine kullanılarak modifiye bağlayıcılar hazırlanmış ve bu bağlayıcılar üzerinde standart deneyler (penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, Fraas kırılma noktası ve özgül ağırlık) uygulamıştır. Epoksi reçine katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre plente agregayla karıştırma esnasında daha az enerji gerektireceği, kısa dönemli yaşlandırmadan sonra saf bağlayıcıyla kıvam açısından aşırı farklılıklarının olmayacağını belirtmiştir. Yaşlandırmadan sonra düktilitenin %2.0 epoksi reçine modifiyeli bağlayıcıya kadar artması ve Fraas kırılma noktası değerlerinin artan epoksi reçine oranıyla sürekli düşmesi epoksi reçinenin bitümün elastikiyetini artırdığının göstergesi olduğunu belirtmiştir. Çalışmalarında %3.0 ER kullanımının yaşlandırılmadan sonraki düktilite değerini azalttığını ve epoksi

reçinenin maksimum kullanım miktarının %2.0 olduğunu söylemiştir. Sonuç olarak %0.75-%1.0-%2.0 oranında epoksi reçine kullanılması durumunda saf bağlayıcının elastikiyetinin artacağı, 70/100 penetrasyonlu saf bitüme kullanılması düşünülen uygulamalarda özellikle %2.0 ER modifiyeli bağlayıcının kullanılması durumunda düşük ısı çatlakları ve elastikiyet nedeniyle yorulma çatlakları açısından avantaj sağlanacağı söylenmiştir.

Widyatmoko vd. (2008), asfalt kaplamalarda daha iyi sonuç elde etmek amacıyla bitüme Trinidad Gölü Asfalt (TDK) ve doğal asfalt ilave etmiştir. Bu modifiye bitümlerde penetrasyonda düşüş, yumuşama noktasında artış, kompleks modülünde artış ve faz açısında düşüş meydana geldiği belirtilmiştir.

Suo ve Wong (2009), çalışmalarında, BSK'larda aşınma tabakalarında meydana gelen yorulma çatlaklarının ilerleyişini incelemiş ve gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK, normal BSK ve taş mastik asfalt numuneleri indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan BSK numunelerinin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduklarını fakat çatlak oluşuktan sonra karışımların dayanımları incelendiğinde kontrol karışımlarının gilsonit modifiyeli karışımlardan daha yüksek dayanım sergilediğini belirlemişlerdir.

Ameri vd. (2011), çalışmalarında, İran'ın 3 farklı bölgesinden (Kermanşah, İlam ve Luristan) elde edilen 5 gilsonit numunesini katkı maddesi olarak kullanmıştır. PG 58-22 ve PG 64-22 performans dereceli 2 çeşit saf bitüme ağırlıkça farklı yüzdelerde (%4, %8 ve %12) gilsonit ilave ederek modifiye bitümler hazırlamıştır. Elde edilen modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık performansları değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda gilsonit kullanımı ile bitümlerin orta ve yüksek sıcaklık performanslarının önemli derecede arttığını belirtmiştir. Gilsonit içeriklerinin artmasıyla bu iyileşmenin devam ettiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak gilsonitin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarında olumlu etki göstermesine rağmen düşük sıcaklık performanslarında olumsuz bir etki yaptığını ve modifiye bitümlerdeki gilsonit içeriğinin artmasıyla beraber düşük sıcaklık performanslarının düştüğü belirtilmiştir.

Arslan vd. (2011), çalışmalarında, 50/70 penetrasyon dereceli bitüm özelliklerinin organik esaslı sentetik çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) ile modifiye edilerek geliştirilmesini amaçlamıştır. OEÇFB'nin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkisi geleneksel (yumuşama noktası testi, duktilite testi, Marshall testi, Nicholson soyulma testi) ve superpave (dönel viskozite, eğilme kirişi reometresi, dinamik kayma reometresi) test metotları ile incelemiştir. OEÇFB, bitüme kütlece %1, %2, %3, %5, %10 oranlarında ilave etmiş ve viskozite test sonuçlarını değerlendirilerek bitüm modifikasyonunda kullanılacak OEÇFB konsantrasyonu %3 olarak seçmiştir. Bitümün düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin OEÇFB modifikasyonu ile iyileştiğini ve %3'lük OEÇFB konsantrasyonlu bitümlü karışımların Marshall stabilitesini %6.1 artırıp, soyulma direncini %30'dan %95'e yükselttiğini belirlemiştir.

Aghajani vd. (2012), çalışmalarında, 60/70 penetrasyonlu bitüme 6-28 aralığında değişik yüzdelerde parça kauçuk (CR) modifiye etmiştir. Bu CR modifiye bitümün penetrasyonunu azalttığını yumuşama noktasını artırdığını belirtmiştir.

Çubuk vd. (2013), çalışmalarında, bitümlü sıcak karışımları iyileştirmek amaçlı aktif maddesi magnezyum olan organik esaslı katkı maddesini bitüm katkısı olarak kullanılmıştır. Mg bileşiğinin, bitümün agrega ile adezyonunu geliştirdiği ve bağlayıcının yüzey gerilimini azaltmak suretiyle agregayı daha iyi ıslatmasını sağlayarak bitümlü karışımın soyulmaya karşı direncini artırdığı fakat magnezyum modifiyesinin bitümün duyarlılığını artırırken karışım stabilitesini önemli ölçüde etkilemediğini belirtmiştir. Sonuç olarak Mg bileşiği ile hazırlanan modifiye bitümlerin yağışlı ve düşük sıcaklıklı bölgelerde karayolu kaplama malzemesi olarak kullanılabilceği söylenmektedir.

Zhang vd. (2012), çalışmalarında 60/80 penetrasyonlu bitüme %3 oranında 60 dakika 5000 devir/dakika karışım hızıyla geliştirilmiş vermikülit (EVMT) ve organik geliştirilmiş vermikülit (OEVMT) modifiye etmiştir. Çalışmada vermikülit, bitümlü karışımlarda kil olarak yani agrega katkısı olarak kullanmıştır. PAV simülasyonu ve yerinde termal yaşlanma(UV) deneyleri karışımın yaşlanma etkilerini araştırmıştır. Araştırmalarının sonucunda EVMT ve OEVMT modifikasyonunun bitümün yaşlanma direnci artırdığını belirtmiştir.

Zhang vd. (2013-a), çalışmalarında SBS ile geliştirilmiş vermikülit birlikte kullanarak EVMT/SBS modifiye bitümün yaşlanma, yumuşama noktası ve penetrasyon değerleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmalarında SBS katkı bitüm ve bu bitüm ile modifiye edilmiş, geliştirilmiş vermikülit modifiye SBS bitüm (EVMT/SBS), setiltrimetil amonyum bromür ve geliştirilmiş vermikülit modifiye SBS bitüm (CTAB-EVMT/SBS), oktadesil dimetil benzil amonyum klorür ve geliştirilmiş vermikülit modifiye SBS bitüm (OBDA-EVMT/SBS) olmak üzere 4 farklı bitümlü sıcak karışımı incelemiştir. Sonuç olarak SBS katkı bitümün yaşlanmayı azalttığı ve genişletilmiş vermikülit modifiye bitümünde sünekliği ve penetrasyonu attırdığını belirtmiştir. OBDA-EVMT/SBS modifiye bitümünde (CTAB-EVMT/SBS) modifiye bitüm ile karşılaştırıldığında OBDA-EVMT/SBS modifiye bitümün yaşlanma direncine daha iyi etki ettiğini söylemiştir.

Zhang vd. (2013-b), çalışmalarında vermikülitin bitüm ile kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yeni bir yaklaşım olan organik geliştirilmiş vermikülit (OEVMT), X-ışını kırını (XRD) analizi ile incelemiş ve thin film oven testi (TFOT) ile yaşlanma direnci etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak, OEVMT bitüm modifikasyonunda kullanılabileceğini ve yaşlanma direncini artırıcı etkiler gösterdiğini söylemiştir.

Manh ve Viet (2013), çalışmalarında karbon fiber, cam fiber ve selülozik fiberlerin farklı sıcaklıktaki (5, 25 ve 40 °C) davranışlarını araştırmış ve esneklik modülündeki artışın asfalt betonu dayanımını artırabildiğini belirtmiştir.

Yang ve You (2015), çalışmalarında bitüme %5 ve %10 oranlarında, işlenmemiş biyo-yağ (UTB), işlenmiş biyo-yağ (TB) ve polimer biyo-yağ (PMB) ilave etmiştir. Bu modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıklarda asfaltın stabilitesini artırabileceğini ve bu modifiye bitümler üzerinde çalışılabileceğini söylemiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Agreg

Çalışmada kullanılan agreg İsparta Belediyesi agreg ocağından temin edilmiştir. Agreg olarak kireçtaşı seçilmiş ve genel agreg özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kireçtaşı agreg özellikleri

Elek Çapları	Özellikler	Standart	Kireçtaşı Agreg
4.75-0.075mm	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	ASTM C 127-88	2.660
	Doygun Özgül Ağırlık		2.652
	Su emme (%)		0.130
25-4.75mm	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	ASTM C 128-88	2.329
	Doygun Özgül Ağırlık		2.428
	Su emme (%)		2.800
	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C 131	20.38

3.1.2. Bitüm

Kullanılan bitümün penetrasyonunun belirlenmesi için bitümlü malzemelerin standart test yöntemi (ASTM D5), yoğunluğun belirlenmesi için yarı esnek bitümlü malzemelerin yoğunluğu standart test yöntemi (ASTM D70), yumuşama noktası için bitümün yumuşama noktası standart test yöntemi (ASTM D36), yanma ve parlama noktası için açık kap test aparatı Cleveland cihazları (ASTM D92), bitümün duktilitesinin belirlenmesi için ise bitümlü malzemelerin süneklik standart test

yöntemi (ASTM D113) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre bitüm özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bitüm özellikleri

Test	Ortalama Değerler	Standart
Penetrasyon (25 °C)	60-70	ASTM D5
Alevlenme noktası	180°C	ASTM D92
Yanma Noktası	230 °C	ASTM D92
Yumuşama Noktası	45.5°C	ASTM D36
Süneklik (5 cm / dk)	>100 cm	ASTM D113
Özgül ağırlık	1.030	ASTM D70

3.1.3. Vermikülit

Genelde bir çeşit trioktahedral mika minerali olarak bilinen vermikülit, hızlı ısıtma ile yapraklara ayrılır ve küçük kurtçuklara benzeyen bir şekil alır. Doğada; oluşumuna ve bulunduğu ortamlara göre toprak, otojenik, metamorfik ve makroskopik olmak üzere dört tipine rastlanmıştır (Toksoy, 1997). Bu çalışmada makroskopik tipi vermikülit kullanılmıştır.

Vermikülit, yeşil, sarımsı kahve ve siyah renkte olabilir. Sertliği Mohs ölçeğine göre 1.2 ile 2.0 arasında değişir, özgül ağırlığı 2.5 gr/cm³'dür. Vermikülit yüksek sıcaklıklarda aniden ısı-şokuna tabi tutulduğunda akordiyon gibi uzamaktadır. Bu karakteristik genişlemenin yapıda bulunan kristal suyunun ani olarak buharlaşması sonucu oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isısal genişleme olayının henüz tam olarak açıklanamamasının nedeni, ağırlıkça toplam aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişlebilmeleridir. Kimyasal bileşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunduğu genişleme olayını etkileyen diğer önemli parametrelerdir. Genişleme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak, 0.8 gr/cm³'den 0.08 gr/cm³'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermikülitin kalitesine ve genişletirmenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısı işlem sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir (Strand, 1983; Loughbrough, 1991).

Vermikülitin satışa sunulmasından önceki son aşama geliştirilmesidir. Maksimum geliştirmeyi elde etmek açısından fırın sıcaklığı ve alıkonma süresi çok önemlidir. Genelde fırın sıcaklığı 1000°C ile 1800°C arasında, alıkonma süresi ise 4 ile 8 saniye olacak şekilde ayarlanmaktadır. Genel olarak, dikey içi tuğla kaplı ve alttan ateş beslemeli fırın tipi kullanılmaktadır. Malzeme beslemesi yukarıdan yapılmakta, malzeme fırın içindeki plakalardan düşerken alevle karşılaşarak bu şok ısı neticesinde genişlemektedir. Genleşen taneler ve tozlar bir fan vasıtası ile emilerek siklonda birbirlerinden ayrılmaktadır (Rau, 1985).

Vermikülit mineralinin kimyasal bileşen oranları çıkarılan madene göre değişmektedir. Dünyanın üç büyük vermikülit işletmesi cevher numunelerinin kimyasal bileşenleri Çizelge 3.3’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.3. Çeşitli vermikülitlerin kimyasal bileşimleri (Meisinger, 1985)

Bileşim	LİBBY (ABD)	ENOREE (ABD)	PALOBORA (GÜNEY AFRİKA)
	%	%	%
SiO ₂	40.16	39.77	39.37
MgO	20.63	18.32	23.37
Al ₂ O ₃	12.01	13.88	12.08
Fe ₂ O ₃	13.00	12.84	5.45
FeO	--	--	1.17
K ₂ O	5.93	5.11	2.46
CaO	1.54	1.02	1.46
TiO ₂	1.44	2.07	1.25
H ₂ O	5.29	6.99	11.20
TOPLAM	100	100	97.81

Dünyada vermikülit rezervlerinin önemli bir kısmı Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Güney Afrika Cumhuriyeti (GAC) ve Rusya'da bulunmaktadır. Bunların dışında Arjantin, Brezilya, Çin, Mısır, Hindistan, Meksika, Kanada, Bulgaristan, Şili, Finlandiya, Fransa, Japonya, Kore, Cezayir, İspanya, Srilanka, Tanzanya, Kenya, Kazakistan, Türkiye, Uganda ve Zimbabve'de de vermikülit yatakları olduğu bilinmektedir.

Vermikülit rezerv miktarı hakkında detaylı bilgi elde etmek mümkün olmamakla birlikte dünya vermikülit rezervinin 50 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir.

Dünyanın en büyük iki vermikülit üreticisi GAC ve ABD dünya ham vermikülitinin yaklaşık olarak 3/4'nü yani 560.000 ton/yıl üretmektedir. Dünya vermikülit üretiminin diğer 1/4'lük kısmını ise Rusya, Brezilya, Japonya ve az miktardaki üretimleri ile diğer ülkeler gerçekleştirmektedir (Potter, 1995).

Türkiye'de bilinen vermikülit yatakları, en önemlisi Malatya-Darende-Kuluncak olmak üzere, Sivas-Yıldızeli-Karakoç, Eskişehir-Sarıcakaya ve Elazığ-Harput-Arduçluk bölgelerinde görülmektedir. M.T.A tarafından etüt edilen ve ayrı sektörden oluşan Malatya-Darende-Kuluncak vermikülit cevherleşmeleri ultrabazik kütleler içinde yer almakta ve oluşumları bu ultrabazik kütleleri kesen alkali intrüziyonlara bağlanmaktadır. Genleşme oranları oldukça düşük olan (~2 kat) cevher ekonomik değere ulaşmamaktadır. Yapılan rezerv hesapları bu zuhurlarda 6-7 milyon ton arasında değişen muhtemel rezervin olduğunu göstermektedir (Aras, 1984).

Ülkemizde bulunan rezervlerden üretim yapılmamaktadır. Tüketim son derece düşük miktarlardadır ve tamamı ithalat yoluyla karşılanmaktadır.

Genleştirilmiş vermikülit, hafif yapı gereçlerinde agrega olarak, binalarda ısı ve ses izolasyonunda, soğuk hava depolarının izolasyonunda, dekorasyon işlerinde, tavan kubbe kaplamalarında, dökümhane ve benzeri yüksek ısı ile çalışan yerlerde ateşe dayanıklı sıva ve kaplama malzemeleri üretiminde kullanılmaktadır. Ziraatte ise toprağın özelliklerini iyileştirici katkı olarak, zirai ilaçlarda ve gübrelerde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına göre vermikülit, perlit, pomza, genleşen killer, camyünü, ytong, strafor beton ve köpüklü beton gibi malzemelere bir alternatiftir.

3.2. Metot

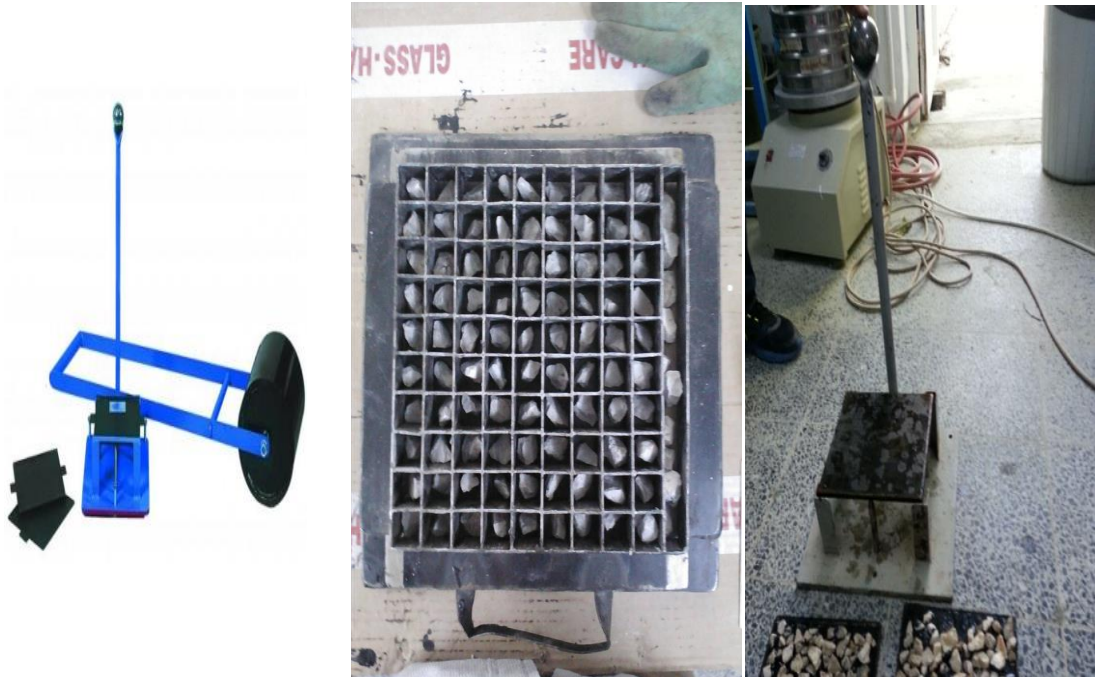
Öncelikle çalışmalarda, kullanılan bitümün özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra saf bitüme ve %9, %13, %14, %19, %22 vermikülit katkılı modifiye bitümlere Marshall stabilite deneyi yapılmıştır. Marshall stabilite deneyi sonucunda optimum vermikülit modifiyesi %14 katkılı bitüm olmuştur. Optimum vermikülit modifiyeli bitüme; vialit, çekip-çıkarma ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

3.2.1. Vialit (yapışma) deneyi

Bu deney, agrega-bitüm adezyonunun su etkisi altında azalmasını tespit etmek amacıyla yapılır.

Deney için gerekli olan aletler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

1. Silindir: Lastik bantlı laboratuvar silindiridir.
2. Çelik bilye: 500 ± 5 gram ağırlığında 50 mm çapındadır.
3. Deney Cihazı: Üç ayar vidası ile yatay durumda ayarlanabilen taban üzerinde deney levhalarının oturtulacağı 3 sivri çubuk ile dört köşebent ve çelik bilyelerin 50 cm yükseklikten serbest düşüşünü sağlayacak dikey bir borudan oluşmaktadır.
4. Düz çelik levha (200mmx200mmx3mm)
5. Mekanik mıcır serici: Metal bir tabla üzerine 9 cm yükseklikte oturtulmuş 100 tane bölmesi olan kafes sistemi ile kafesin altındaki oyuklara yerleştirilip çıkarılabilen hareketli metal levhadan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Vialit deney aleti

19 mm göz açıklıklı elekten geçip 9,5 mm'lik elek üzerinde kalan agrega numunesi iyice yıkanıp saf su ile çalkalandıktan sonra 110 °C lik etüvde kurutulur. Birlikte yapılacak üç deney için yassı ve uzun olmayan kübik tanelerden 300 tane agrega seçilir. Sericinin kafes sistemindeki her bir bölmeye birer tane olmak üzere 100 adet agrega yerleştirilir. Kullanılacak bitüm deneye başlamadan en az 2 saat önce 145-150 °C etüvde ısıtılır. Aynı şekilde çelik levhalarda 145 °C - 150 °C etüvde 30 dakika ısıtılır.

Isıtılmış levhalar üzerine, ısıtılmış olan bitümden veya hazırlanan BSK'dan 40 gram tartılarak dökülür ve bir spatula ile levhanın tüm yüzeyine düzgün bir şekilde yayılır. Asfalt deney levhası mekanik serici içine yerleştirildikten sonra, mıcır sericisinin hareketli levhası süratle çekilerek mıcırların asfalt tabakası üzerine serbestçe düşmesi sağlanır. Mekanik sericiden çıkarılan deney levhası, silindirme sırasında agregaların levha üzerinden kaymasını önlemek amacı ile levhanın soğuması ve numunenin 55 °C - 60 °C civarına düşmesi için laboratuvar sıcaklığına bağlı olarak 10-15 dakika bekletilir.

Silindirme işlemi, laboratuvar silindiri ile agrega serilmiş levha üzerinden 3 defa bir yöne, 3 defa buna dik yönde olacak şekilde 6 geçiş yapılır (gidiş-dönüş 1 geçiştir).

Silindirilmiş deney levhaları laboratuvar ortamında bir saat bekletildikten sonra 35 °C lik su banyosunda 24 saat tutulur. Bu sürecin sonunda su banyosundan çıkarılan levha ayarlanmış deney aletine, 3 sivri çubuğu üzerine agregalar aşağıya gelecek şekilde yerleştirilir. Çelik bilyenin 50 cm lik serbest düşüşü, bilye deney aletinin borusu üzerinde hafif eğimli yuvaya konularak sağlanır. Deney levhası üzerine 10 saniyelik ara ile uygulanan toplam 3 serbest düşüşten sonra levha çıkarılır ve düşen agregalar sayılır. Düşen mıcırlar, toplam mıcır sayısının yüzdesi olarak ifade edilir. Deney sonucu, aynı cins malzeme ile aynı şartlar altında yapılmış üç deneyin sayısal ortalaması alınarak belirlenir (Gürer, 2010).

Bu sayısal değer Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre değeri maksimum %12 olması gerekir.

3.2.2 Çekip-çıkarma (Pull out) deneyi

Agrega-bitüm adezyonunu değerlendirmek için yapılan yapışma deneylerinden bir tanesi de çekip-çıkarma deneyidir. Şekil 3.3.'de çekip çıkarma cihazı görülmektedir.

Yapışma özelliklerini farklı açıdan araştırmak maksadıyla geliştirilen bu deneyin amacı, agrega-bitüm arasındaki yapışma bağlarının ne kadar büyüklükte bir gerilmeyle kırılabileceğinin belirlenmesidir (Gürer, 2010). Deneyin yapılışı:

15x15 cm'lik plakalar üzerine hazırlanan numunelerde gerçekleştirilir. Bu plakaların kenarlarına uygulanan bitümün yayma esnasında dökülmesini önlemek ve plakanın her yüzünde agrega numunelerinde aynı gömülme derinliğini oluşturabilmek için 3mm yüksekliğinde kenarlıklar oluşturulur. Çekip çıkarma deney cihazında agrega çekmek için çok farklı çekme aparatları denenmiş, en sonunda kalker kökenli agrega numunelerinde kanca uçlu, volkanik kökenli numunelerde ise sıkıştırırmalı çekme aparatlarının kullanılmasına karar verilmiştir.

Agrega (19-25 mm elekleri arasında kalan) numunesi üzerine 2 mm çapında delikler açılır. Bu numuneler iyice yıkayıp saf su ile çalkalandıktan sonra 110 °C lik etüvde kurutulur. Numuneler temizlenip kurutulduktan sonra 2 tonluk çekme dayanımına sahip epoksi reçineli yapıştırıcı kullanılarak piston çekme uçları agrega numunelerine açılmış delikler içerisine yapıştırılarak 24 saat boyunca sertleşmeye bırakılır. Deney yöntemine göre 3 mm'lik bağlayıcı film kalınlığı oluşturacak şekilde plaka numuneler üzerine 111 gr tatbiki yapılacak bitüm ve ya hazırlanan BSK'dan dökülür.

Bitüm döküldüğü anda plaka sıcaklıklarının 40 °C olmasına dikkat edilmelidir. Her bir plaka üzerine, çekme sırasında birbirini etkilemeyecek şekilde agrega numuneleri yapıştırılır.

Bu işlemler yapıldıktan sonra plakalar oda sıcaklığında 24 saat bekletilir. Daha sonra plaka numuneler çekip çıkarma deney cihazına yerleştirilerek numuneler sırayla çekilir. Deney esnasında agrega numunelerini bitüm filminden ayırmak için gerekli en yüksek çekme kuvveti (kg), agrega koştugu anda bitüm filminde meydana gelen uzama, agrega ortalama yüksekliği, agrega gömülme derinliği ve agrega yapışma

alanları kaydedilir. Agregaya yapışma alanlarını bulmak için çekilen agreganın numunesinin yaklaşık yapışma izleri milimetrik kağıt üzerine çıkartılır ve kağıtlar taranıp 1/1 ölçekte bilgisayara aktarılarak bir çizim programı yardımıyla yaklaşık yapışma alanları belirlenir (Şekil 3.3) (Gürer, 2010).



Şekil 3.2. Çekip-Çıkarma deney aleti



Şekil 3.3. Çekip-Çıkarma deneyi aşamaları

3.2.3 Penetrasyon deneyi

Yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının vizkozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda Penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon değerini ölçmek için kullanılan cihaza penetrometre denir.

Deney yapılışı ise, Penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. Numune istenen sıcaklıkta olmalıdır (genellikle 25 °C'de). İstenilen ağırlıkta (genellikle 100 gr) numune yüzeyine ancak degecek şekilde ayarlanır. İğne belirli bir zaman aralığında serbest bırakılır. Genellikle 5 sn' lik zaman bitiminde Penetrasyon değeri okunur. Kabın kenarından ve birbirinden 1'er cm'lik uzaklıkta en 3 okuma yapılır. Bu okumalar en kısa zamanda yapılmalıdır. İğne her seferinde uygun bir çözücü ile (karbon tetraklorür, trikloretilen, benzin) ısıtılmış bezle silinir. Sonra kuru bezle temizlenir (ASTM D5-97, 2003).

Viskozite ve Penetrasyon derecesi benzer sayılarla verilir. Örneğin, 80-100 penetrasyonlu asfalt, 50-100 viskoziteli asfalt. Fakat bunlar farklı şeylerdir. Bunların benzer şekilde ifade edilmesi yanlışlara yol açar. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak bağlayıcı söz konusudur. Buna karşılık viskozitede durum terstir. Normal yol işlerinde kullanılan asfaltların penetrasyonu 30 ile 300 arasında değişir. Penetrasyonu aynı olan iki asfalttan yumuşama noktası yüksek olan sıcağa daha dayanıklıdır (Umar ve Ağar, 1991).

3.2.4. Özgül ağırlık deneyi

Bir bağlayıcının özgül ağırlığı bunun belli bir hacminin ağırlığının aynı hacimde su ağırlığına oranıdır. Bir bağlayıcının özgül ağırlığı başlıca iki bakımdan önemlidir. Birincisi; çok defa ağırlıkla hacim arasındaki bağıntının bilinmesi faydalıdır. Bitümlü kaplamalara ait şartnamelerde oranlar ağırlıkça yüzde cinsinden belirtilir. Buna karşılık bağlayıcılar çok defa hacimce ölçülür. Sıcak karışımlarda ise bağlayıcının genleşme katsayısının belirlenmesi faydalıdır. Böylece herhangi bir sıcaklıktaki özgül ağırlık hesaplanabilir. İkincisi; hidrokarbonlu bağlayıcının cinsinin bilinmesi açısından özgül ağırlık yararlıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Özgül ağırlık tayini ile piknometre metodu kullanılır. Bu metotta, önce boş piknometre kabı kuru olarak tartılır, daha sonra su doldurulur ve tekrar tartılır. Piknometre kabı boşaltılır, kurutulur, içine uygun miktarda bağlayıcı genellikle 2/3 yüksekliğine kadar ya küçük parçalar halinde veya eritilmiş malzeme akıtılarak konur. Eğer ısıtılmış malzeme akıtılacak ise malzeme içinde hava kabarcıkları kalmamasına dikkat edilmesi gereklidir. Piknometre içinde kalan boşluk su ile doldurulur ve tartılır. Deneyde kullanılacak su saf su olmalıdır. Deney, genellikle 25 °C’de yapılır. Farklı sıcaklıklarda yapılacaksa 25 °C’ye çevirmek için çeşitli abaklardan yararlanılır (Umar ve Ağar, 1991). Özgül ağırlık hesabı:

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.1)$$

A= Piknometre ağırlığı (gr)

B= Su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)

C= Piknometre ve asfalt ağırlığı (gr)

D= Piknometre, asfalt ve su ağırlığı (gr)

3.2.5. Marshall stabilite deneyi

Bu metot, Marshall Stabilite deney aleti yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindir briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar (ASTM D 1559-89, 1992). Ülkemiz karayollarında bitümlü karışımlara uygulanan stabilite deneyi Marshall deneyidir. Bu deney esas olarak serbest basınç deneyi olup numune yüklendiği sırada tamamen sınırlanmaz (Umar ve Ağar, 1991).

Marshall deney numuneleri en az bir gece oda sıcaklığında bekletildikten sonra boyları ölçülerek havada, suda ve doymuş-yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve deneye alınır. Numuneleri istenilen sıcaklığa getirmek için 30-40 dakika su banyosunda veya 2 saat etüvde bekletilir. Banyo ve etüv sıcaklığı asfalt çimentolu briketler için 60 °C’dir. Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Akma ölçer (flowmeter) yerleştirilerek sıfırlanır. Maksimum yüke erişinceye kadar, dakikada 50.8 mm’lik (2 inç) bir hızla yükleme yapılır. Maksimum yük kaydedilir akma ölçer

boşaltılır ve akma değeri ölçülür. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yükün saptanmasına kadar geçen süre 30 sn'den fazla olmamalıdır. Numune yüksekliği 63.5 mm'den (2 ½ inç) farklıysa Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır (ASTM D 1559-89, 1992).

Deneyde; üst segman sabittir. Alt segman yükleme hızı ise 50.8 mm/dakikadır. Basınç arttıkça stabilometrede okunan değer artarak maksimuma ulaşır, daha sonra düşmeye başlar. Bu anda numune kırılır. Stabilometrede okunan maksimum değer yardımıyla bitümlü karışımın stabilitesi saptanır. "Marshall Stabilitesi" adı verilen bu değer örneğin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında örneğin çökme ya da hareket miktarı ölçülür. Buna "Akma" denir. Ayrıca bu deneyle karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu bulunan agreganın boşluğu yüzdesi saptanır (Umar ve Ağar, 1991). Marshall Stabilite test aleti Şekil 3.4.'de verilmiştir. Marshall Stabilite test tokmağı Şekil 3.5.'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Marshall stabilite deney aleti



Şekil 3.5. Marshall stabilite deney tokmağı

3.2.5.1. Marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması

Deney numuneleri 63.5 ± 1.27 mm (2.5 inç ± 0.05 inç) yüksekliğinde briket hazırlayabilecek miktarda (yaklaşık 1200 gr) agrega numunesi ile önceden belirlenmiş miktarda bitüm ile hazırlanır (Önal ve Kahramangil, 1993).

Asfalt çimentosu ve sıvı petrol asfaltın 170 ± 20 °C’de vizkosite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık, karıştırma sıcaklığıdır. Numuneler 101.6 mm (4 inç) çapında ve 76.2 mm (3 inç) yüksekliğindeki numune kalıbında, 457.2 mm (18 inç) den düşen 4536 gr (10 lb) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Numunenin her iki yüzüne trafik durumuna göre orta trafik için 50, yüksek trafik için 75 darbe vurulur.

3.2.5.2. Farklı bitüm miktarlarında karışımın maksimum özgül ağırlığı

Bitüm miktarının değişmesi, bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmedeğinden, her bir bitüm yüzdesi için maksimum özgül ağırlık aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Önal ve Kahramangiller, 1993):

$$D_T = \frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + G_b} \quad (3.2)$$

D_T = Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

W_a = Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı

G_{ef} = Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitüm özgül ağırlığı

3.2.5.3. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agreganın daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacim yüzdesi olarak hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993):

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100+W_a} \times 100 \quad (3.3)$$

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı

G_{sb} = Agreganın hacim özgül ağırlığı

W_a = Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı

3.2.5.4. Sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu, kaplanmış agreganın daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir (Önal ve Kahramangil, 1993). Denklemleri:

$$V_h = \frac{(D_T - D_p)}{D_T} \times 100 \quad (3.4)$$

$$V_f = \frac{(VMA - V_h)}{VMA} \times 100 \quad (3.5)$$

V_h = Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki agreganın boşluğu

V_f = Asfaltla dolu boşluk yüzdesi

D_T = Kaplama karışımının max. özgül ağırlığı

D_P = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı

3.2.5.5. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi

Optimum bitüm yüzdesinin tayin edilebilmesi için çeşitli bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait Marshall stabilite, birim ağırlık, bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi ve boşluk oranı grafiklerinin çizilmesi gerekir. Asfalt çimentosunun Marshall stabilite değerini maksimum yaptığı değer, maksimum birim ağırlığı veren asfalt çimentosu oranı, şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesini %80 olarak sağlayan bağlayıcı oranı %4 boşluk oranını (şartnamede belirtilen % 3-5 arasındaki sınır içinde kalan) sağlayan asfalt oranı grafiklerden bulunur. Bulunan dört asfalt oranının ortalaması optimum asfalt çimentosu oranını verecektir (Umar ve Ağar, 1991).

Bu orana tekabül eden akma değeri akma-bitüm grafiğinden bakılarak, şartnamede belirtilen değerlerin (2 mm-4 mm) arasında olup olmadığı kontrol edilir. Bu şekilde saptanan bağlayıcı oranına göre gerçekleştirilen bir beton asfalt karışımı şartnamelerde aranan özellikleri taşıyacaktır (Umar ve Ağar, 1991).

3.2.6. İndirekt Çekme Mukavemeti

İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) testi, Marshall cihazı kullanılarak dakikada 51 mm'lik yük artış hızında yapılır. ITS testi, çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklenen ve paralel hareket eden yüklerin sıkıştırması ile silindirik deney numunenin kırılmasını kapsar. ITS deneyi, asfalt betonunun gerilme özelliklerini belirlemek için uygulanır. Bu şekilde yol yüzeyinin kırılma özellikleriyle daha iyi bir bağlantı kurulabilir. ITS değerini hesaplamak için kırılmış olan deney numunesine uygulanan maksimum yüke göre aşağıdaki denklem kullanılır (Ahmedzade vd., 2008):

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi x t x d} \quad (3.6)$$

P_{max} : Uygulanmış maksimum yük (kN),

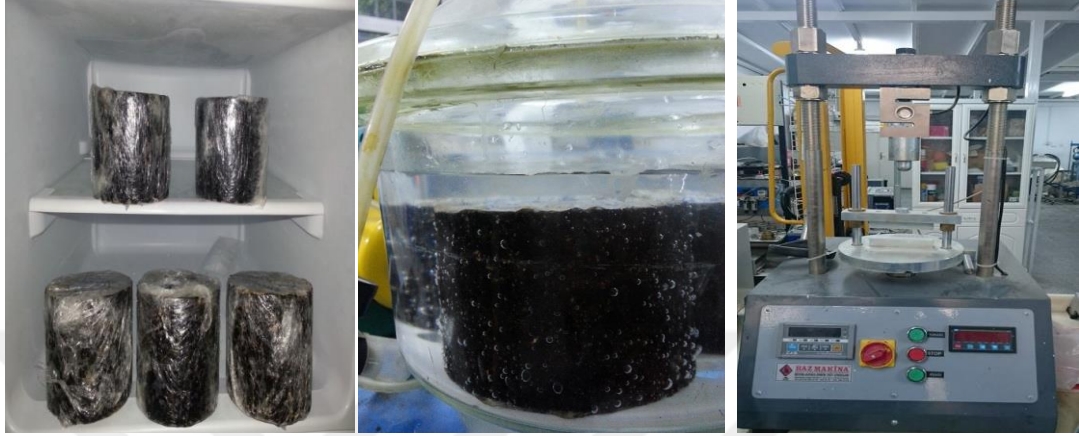
t : Numunenin kalınlığı (mm),

d : Numunenin çapı (mm).

Bunun için öncelikle elde edilen karışımdan dört adet Marshall numunesi hazırlanır. Numuneler kalıp içerisinde ortam sıcaklığında 24 saat bekletilir. 24 saat dolduktan sonra numuneler kalıptan çıkarılır ve 3 noktadan yükseklik çap ölçümleri alınır. Ölçümler alındıktan sonra numuneler 72 saat boyunca 40 °C sıcaklıkta bekletilir. 72 saat sonunda dört numune de etüvden çıkartılır ve kuru ağırlıkları ölçülür. Dört numune 25 °C sıcaklığa gelinceye kadar soğumaya bırakılır. Numuneler 25 °C sıcaklığa ulaştıklarında şartlandırma için hazırlanan iki numune 25 °C sıcaklıkta su banyosuna 24 saat boyunca beklemek üzere yerleştirilir. Şartlandırılmamış diğer iki numune ITS_{KURU} indis değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılır. Su banyosunda bekleyen numuneler 24 saat dolunca banyodan çıkartılır ve üstünde en az 2.5 cm su olacak şekilde su dolu bir kaba konularak doygunluk oranı %55-80 arasına gelinceye kadar vakumlanır. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra şartlandırılmış 2 numunenin sudaki ve yüzey kuru suya doygun ağırlıkları ölçülür. Daha sonra şartlandırılmış bu iki numune streç film ile hava almayacak şekilde sarılır ve 16 saat, -18 °C sıcaklığa ayarlanmış kabinde dondurulur. Dondurulan numuneler kabinden çıkartılır ve 24 saat beklemek üzere 60 °C su banyosunda bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numuneler 25 °C sıcaklıkta suya iki saatliğine yerleştirilir. İki saat sonunda numuneler sudan çıkarılıp ITS_{ISLAK} indis değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılır. Bu işlemler esnasında karışıma ilave edilecek aktif filler belirlenir ve sırasıyla mevcut karışıma dahil edilir. Elde edilen her bir yeni karışımdan altışar adet daha ϕ 100mm Marshall numuneleri hazırlanır ve ITS_{KURU} ve ITS_{ISLAK} değerleri elde edilir. Modifiye edilmemiş numune ve modifiye edilmiş numunelerin Çekme Mukavemeti Oranı (Tensile Strength Ratio – TSR) aşağıdaki formülle hesaplanır. Tipik TSR değerleri 0.70-0.90 aralığındadır. BSK karışımın tipine bağlı olarak 0.70 altında veya 0.90 yukarıda değerlerini görmek nadir değildir. Şartnamede çekme dayanımı oranı %80' dir. TSR hesabı:

$$TSR = \frac{ITS_{ISLAK}}{ITS_{KURU}} * 100 \quad (3.7)$$

Burada ITS_{ISLAK} ve ITS_{KURU} değerleri ıslak ve kuru ITS değerlerinin ortalaması olup TSR değeri ortalama ıslak ve kuru değerlerinin oranının yüzde olarak hesaplanmasıdır (ASTM D6931, 2012). İndirekt çekme deney aleti ve deney aşamaları Şekil 3.6.'de verilmiştir.



Şekil 3.6. İndirekt çekme deneyi aşamaları

3.2.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

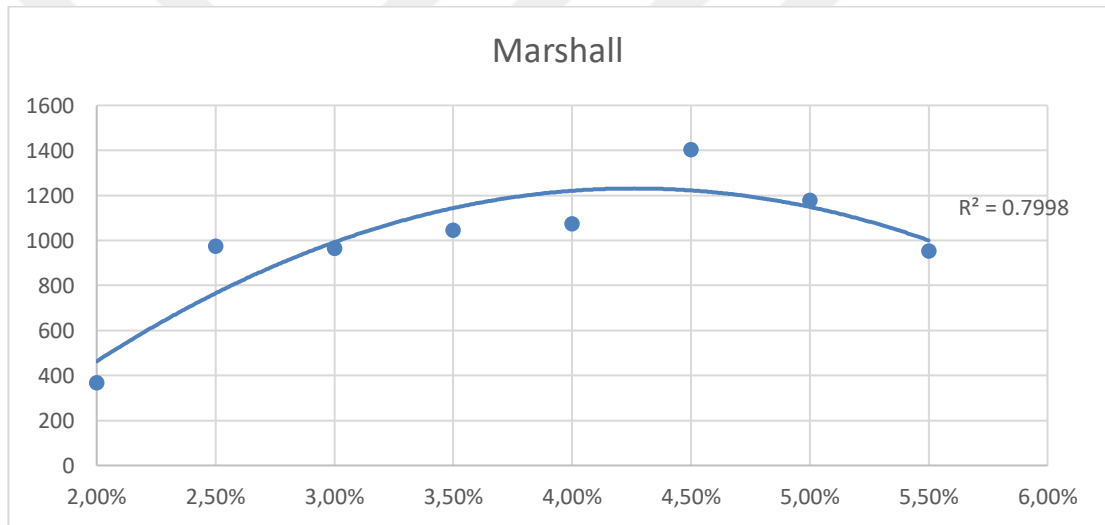
Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir (Selçuk Üniversitesi, 2016). Çalışmada kullanılan geliştirilmiş vermiküitin SEM görüntüsü alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Kireçtaşı Optimum Bitüm Yüzdesi

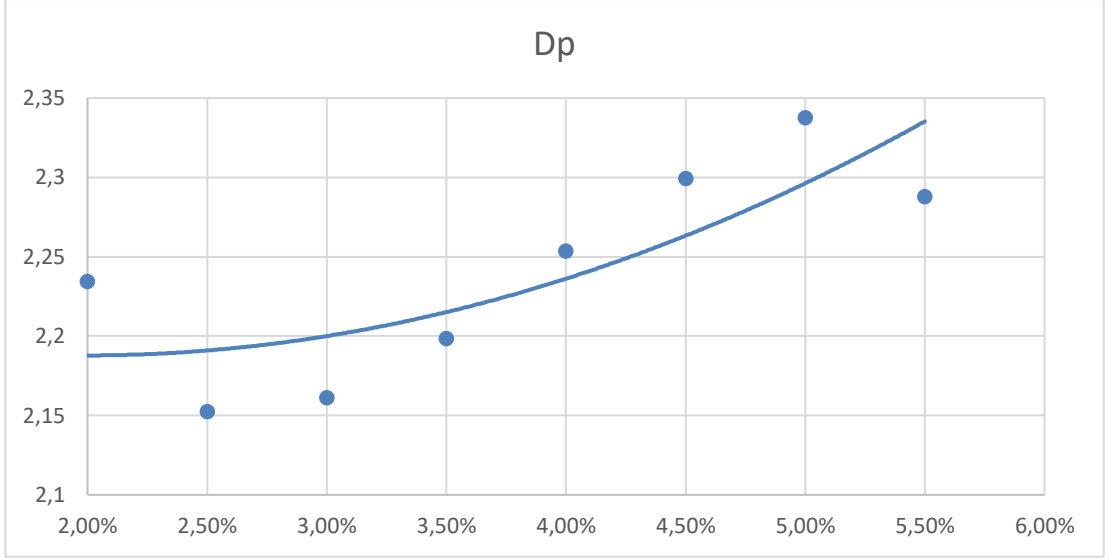
Optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi için Marshall deney metodu ve numuneleri hazırlanmış, agrega gradasyonu sabit tutularak % 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 oranlarında bitüm oranı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına ilişkin grafikler Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4'de görülmektedir.

Deney sonucunda maksimum stabilite değeri %4.5 bitüm oranı olarak hesaplanmıştır.



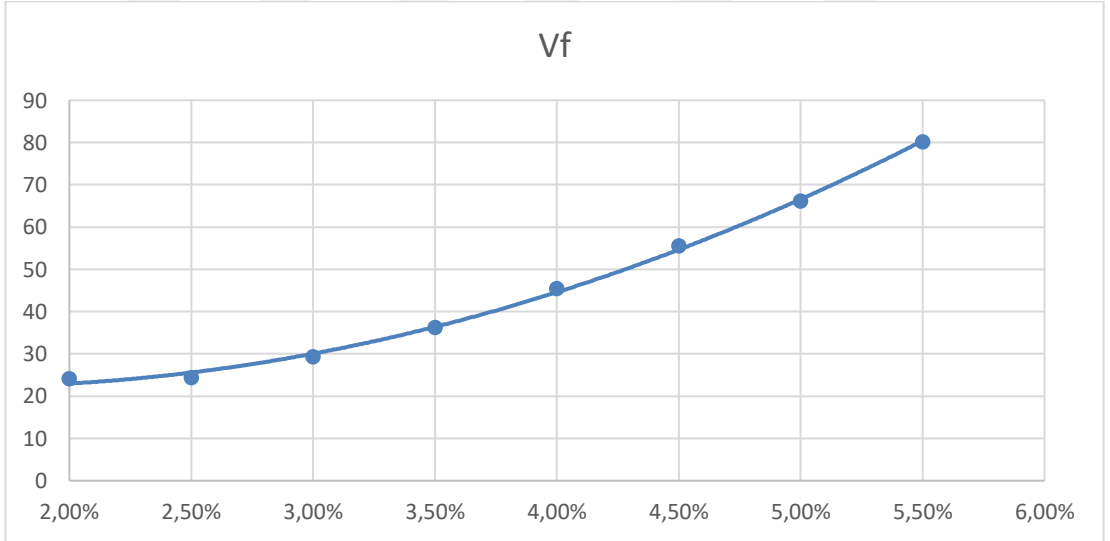
Şekil 4.1. Karışımın stabilite-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı en yüksek değeri %5 boşluk oranına tekabül etmiştir. (Şekil 4.2).



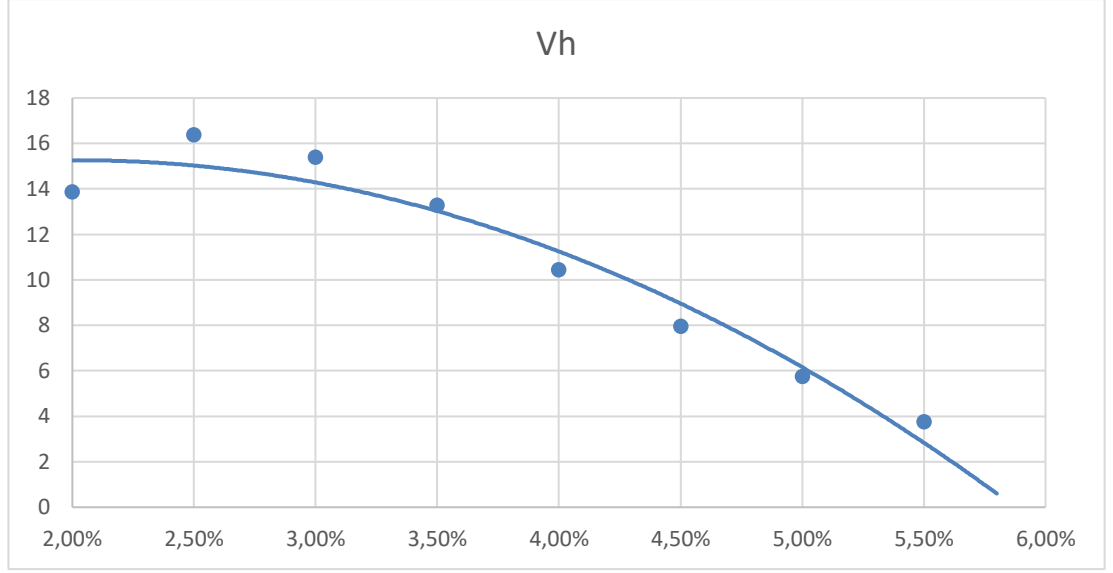
Şekil 4.2. Karışımın birim ağırlık-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi %80 olarak sağlayan bağlayıcı oranı % 5.5 olarak görülmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda hava boşluğu 5 olarak tayin edilmiştir.



Şekil 4.4. Karışımdaki boşluk hacmi-bitüm ilişkisi

Akma değeri asfalt kaplamaların plastiklik ve esneklik özelliklerini yansıtan değerdir. Marshall numunelerinin kırıldığı yüke tekabül eden deformasyonunu temsil eden akmanın değeri sıkışmış karışımların iç sürtünmesinin bir ölçüsüdür ve akma değeri ile iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki vardır (Umar ve Ağar, 1991). Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5’de bulunan dört asfalt oranının ortalaması optimum asfalt çimentosu oranını verecektir.

$$\text{Optimum Bağlayıcı Oranı} : \frac{4.5+5+5.5+5}{4} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’den optimum bağlayıcı oranı %5 olarak bulunmuştur.

4.2. Vermikülit Katkılı Marshall Stabilité Deney Numunelerin Hazırlanması

4.2.1.Karışım tasarımı

Çalışmada geliştirilmiş vermikülit kullanılarak asfalt betonunun davranışını incelemek ve optimum vermikülit katkıli bitümü bulmak amaçlanmıştır. Deney için

6gr, 8gr, 9gr, 12gr, 14gr vermikülit katkıli modifiye bitümler hazırlanmıştır. Deney gruplarında aynı agrega ağırlığı (1245gr) kullanılmıştır. Bağlayıcı (% 5) yüzdesi vermikülit kullanılarak azaltılmıştır. Vermikülit modifiyesinin asfalt betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini incelemek için, deney grubu sonuçları istatistiksel olarak kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır. 5 farklı yüzdelerde vermikülit (%9, %13, %14, %19, %22) kullanılarak asfalt karışımları Marshall testi için hazırlanmıştır. Çalışmada en iyi sonucu elde edebilmek için 5 farklı vermikülit asfalt karışımı için 3'er numune hazırlanmıştır. Vermikülit oranları bitüm ağırlığı yüzdesi (62.25 gr) baz alınarak hesaplanmıştır. Vermikülit oranları %9, %13, %14, %19, %22 olarak belirlenmiştir. Vermikülit çalışma matrisi Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Vermikülit çalışma matrisi

Tekrar	Deney Grubu	
	Vermikülit Oranı %	Ağırlık (gram)
3	9	6 gr
3	13	8 gr
3	14	9 gr
3	19	12 gr
3	22	14 gr

4.2.2. Vermikülit ve bitüm karışımı

Başlangıçta vermikülit, agrega ve bitümü karıştırma tekniği için en basit yöntemlere başvurulmuştur. Karışım hazırlandığı esnada kaptaki bağlayıcının viskozitesini sabit tutabilmek için karıştırma kabı devamlı ısıtılmıştır. Asfalt betonunu hazırlarken kullanılan agregalarda bağlayıcının viskozitesini sabit tutabilmek için 140 °C etüvde 2 saat bekletilip kullanılmıştır. Bütün malzemeler el gücüyle kaşık yardımıyla karıştırılmıştır. Karışım eşit bir kıvama gelinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

4.2.3. Marshall stabilitesi ve akma

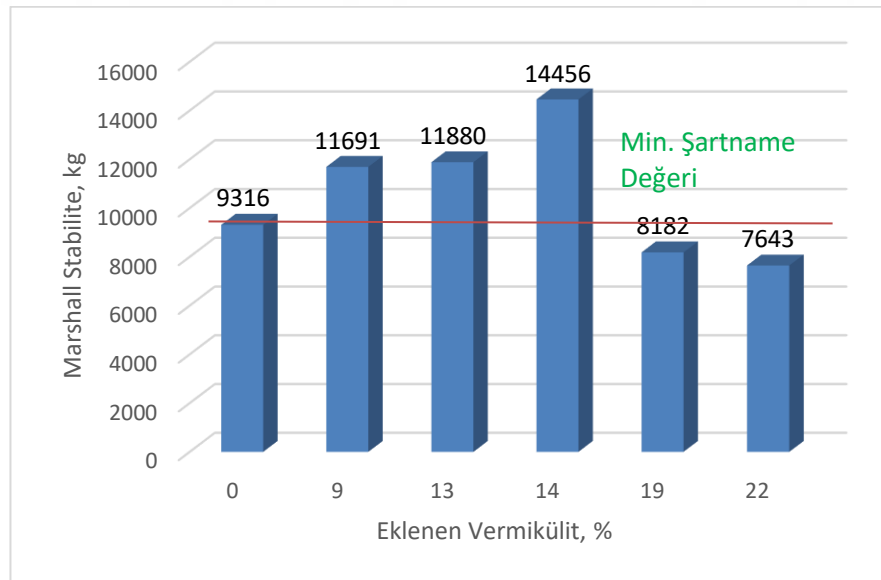
Asfalt betonu şahit numunesi kullanılan agreganın ağırlık cinsinden %5 (62.25 gram) oranında bitüm eklenerek hazırlanmıştır. Modifiye bitümler 62.25 gram bitüm azaltılarak 6-8-9-12-14 gr vermikülit ilave edilerek hazırlanmıştır. Marshall dizayn

sonuçları, her bir agrega karışım formülasyonunun optimum bitüm içeriği sıkıştırılmış silindirik numunelerden elde edilmiş ve her vermikülit asfalt karışımı grubundan 3 deney numunesinin ortalamasından elde edilen Marshall Stabilite değerleri kaydedilmiştir.

Çizelge 4.2. Marshall stabilite ve akma sonuçları

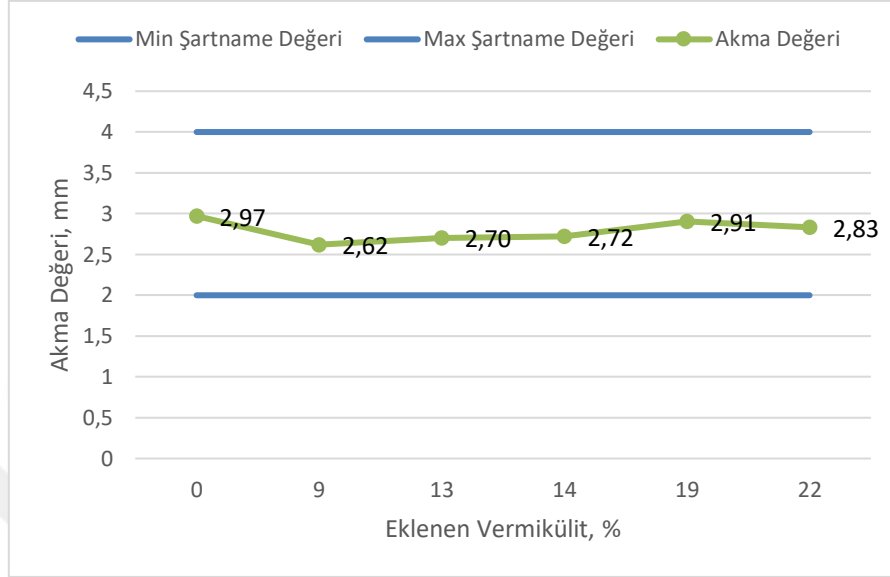
Kullanılan Bitüm (gram)	Kullanılan Vermikülit (gram)	Vermikülit %	Karışımın Bitüm Oranı %	Marshall Stabilite kg	Akma mm
62.25	0	0	5	931.6	2.97
56.25	6	9	5	1169.1	2.62
54.25	8	13	5	1188.0	2.70
53.25	9	14	5	1445.6	2.72
50.25	12	19	5	818.2	2.91
48.25	14	22	5	764.3	2.83

Şekil 4.5’de ağırlıkça yüzdelere göre numunelerin Marshall stabilite değerleri ve akma değerleri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi %9, %13, %14, vermikülit katkıları numuneler şartname sınır değerini karşılamaktadır.



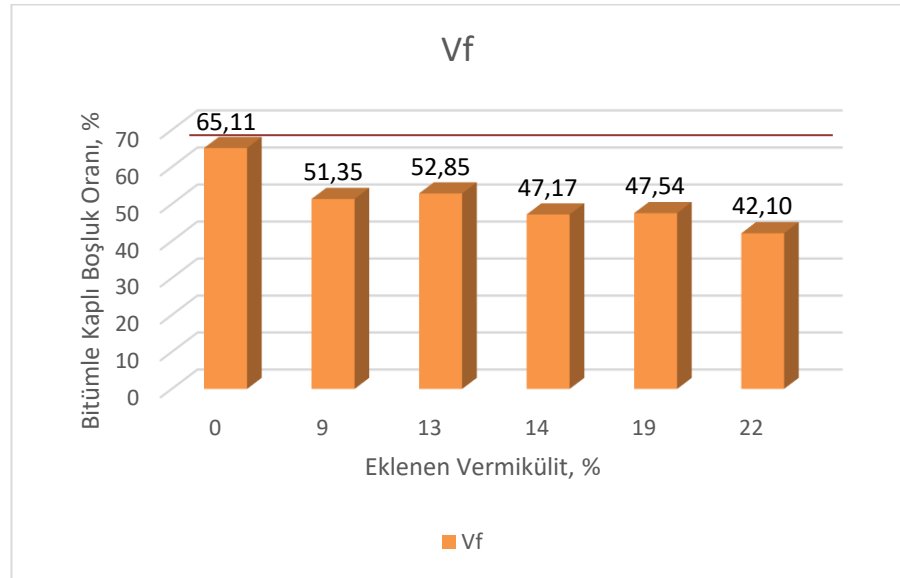
Şekil 4.5. Marshall stabilite değerleri

Şekil 4.6'de ağırlıkça yüzdelerine göre vermikülit katkıli numunelerin akma değerleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm numuneler şartnameye uygundur.



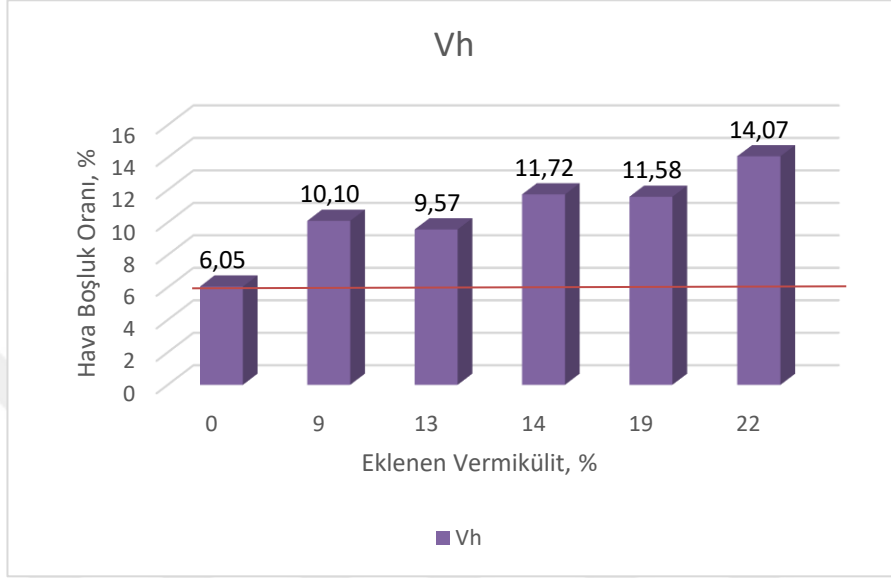
Şekil 4.6. Akma değerleri

Şekil 4.7'ye bakıldığında hiçbir vermikülit katkıli numunenin şartname değerlerini sağlamadığı görülmektedir.



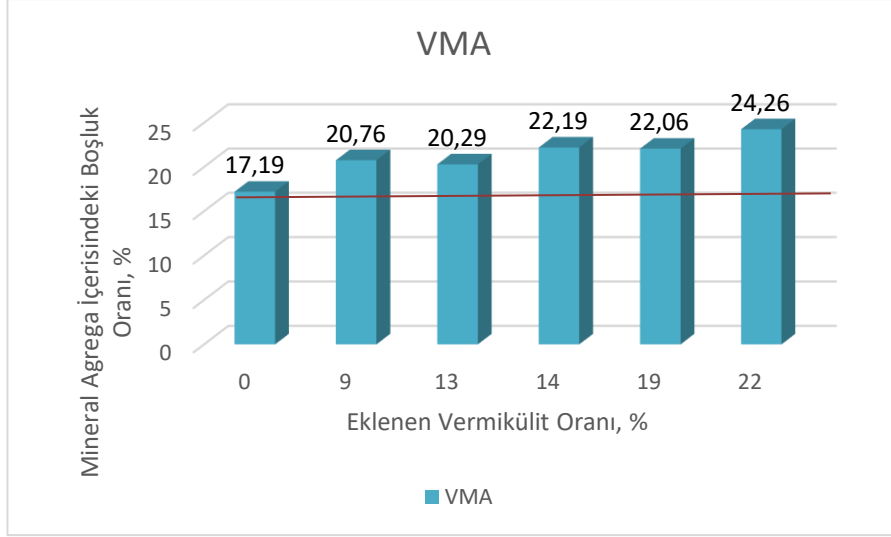
Şekil 4.7. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi değerleri

Şekil 4.8’da vermikülit yüzdelere göre BSK numunelerinin boşluk oranları görülmektedir. Şekilden de görüleceği hiçbir vermikülit katkılı numune şartname değerlerini sağlamamaktadır.



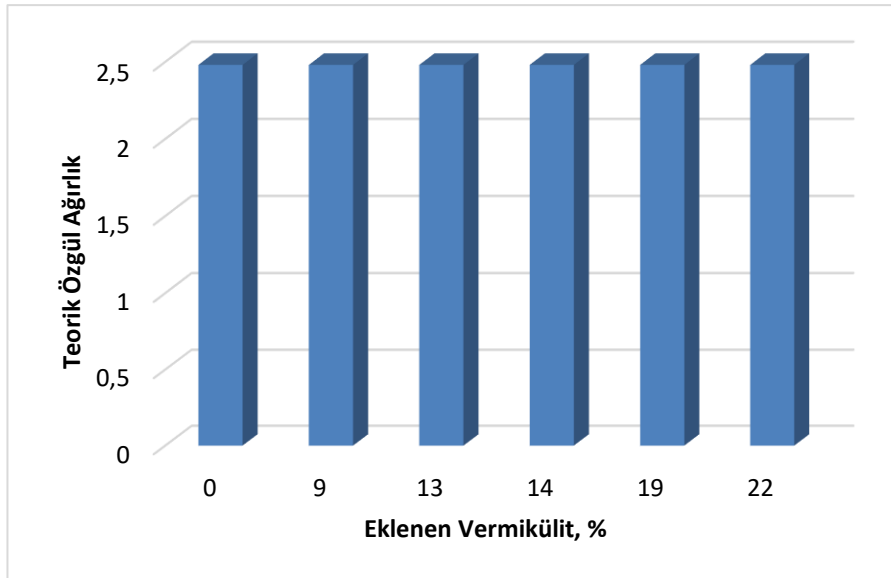
Şekil 4.8. Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki agrega boşluğu değerleri

Şekil 4.9’da vermikülit yüzdelere göre BSK numunelerinin mineral agrega içerisindeki boşluk oranı değerleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği hiçbir vermikülit katkılı numune şartname değerlerini sağlamamaktadır.



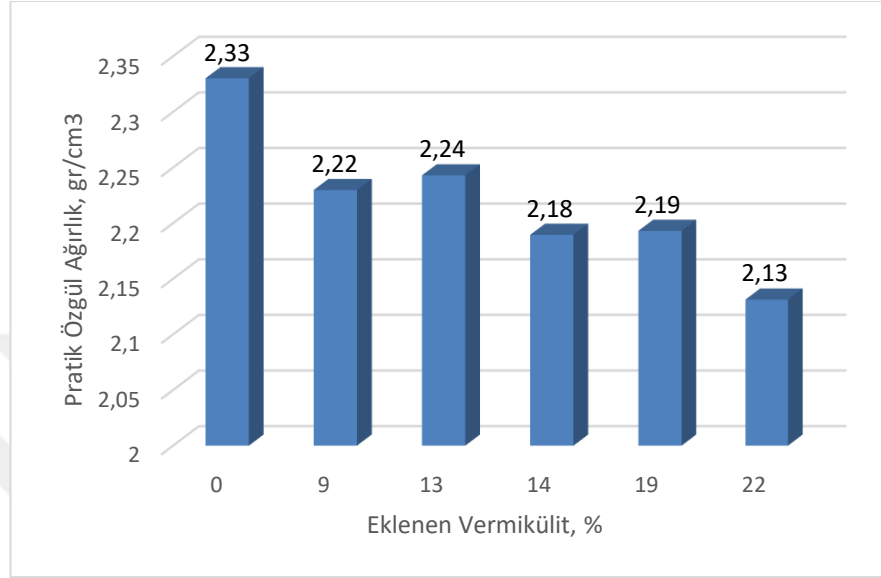
Şekil 4.9. Mineral agrega içerisindeki boşluk oranı değerleri

Şekil 4.10'de vermicülit yüzdelerine göre BSK numunelerinin teorik özgül ağırlık değerleri görülmektedir. Teorik Özgül ağırlık değeri tüm numunelerde aynıdır. Çünkü vermicülit katkılı numuneler, agrega sabit tutularak ve bitüm oranına, bitümden azaltılan miktar kadar vermicülit eklenerek elde edilmiştir. Vermicülit katkılı bitümlü sıcak karışımlar, karışımın bitüm yüzdesi ve agrega yüzdesi sabit tutularak hazırlanmıştır.



Şekil 4.10. Teorik özgül ağırlık değerleri

Şekil 4.11’de vermikülit yüzdelere göre BSK numunelerinin pratik özgül ağırlık değerleri görülmektedir. En yüksek pratik özgül ağırlık değeri %13 vermikülit katkılı BSK da elde edilirken vermikülit katkısının artması ile pratik özgül ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.11. Sıkıştırılmış karışımın pratik özgül ağırlık değerleri

Marshall stabilite deney sonuçları incelendiğinde; agregaların bitüm ile kaplanmasında sorun olduğu, vermikülitin hava boşluk oranını artırdığı görülmüştür. Fakat vermikülitin Marshall stabilite değerini artırdığı belirlenmiştir. En yüksek Marshall stabilite değerini veren %14 vermikülit katkılı numune, optimum vermikülit katkılı numune olarak belirlenmiştir.

4.3. İndirekt Çekme Deneyi

4.3.1. Karışım tasarımı

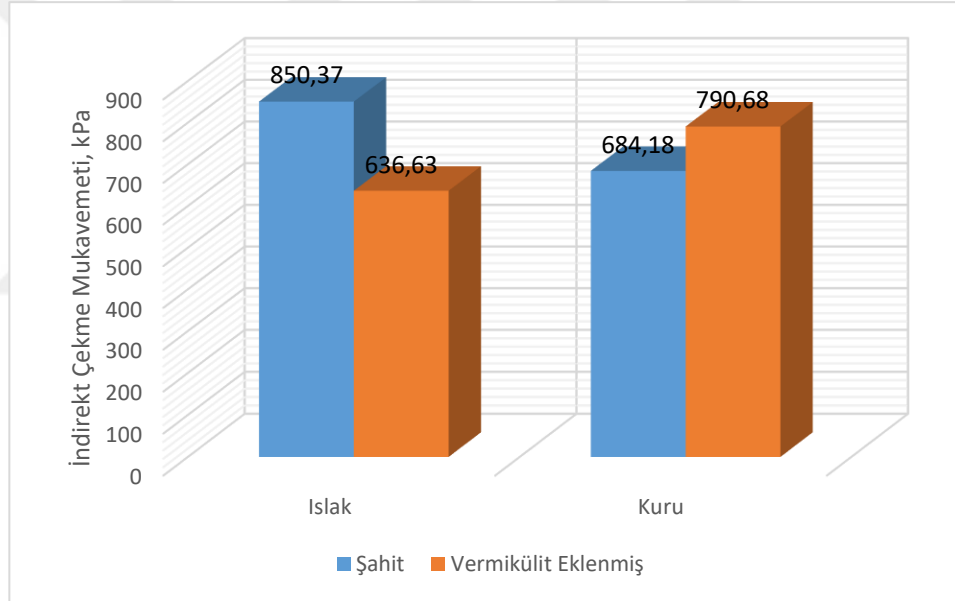
Marshall Stabilite deneyinde en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı bitümden 4 numune hazırlanmıştır. Karşılaştırma için %5 yüzdeli saf bitümlü sıcak karışımdan da 4 adet numune hazırlanmıştır. %14 vermikülit modifikasyonunun asfalt betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini incelemek için, deney grubu sonuçları kontrol

grubu ile karşılaştırılmıştır. İndirekt çekme vermikülit matrisi Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. İndirekt çekme için vermikülit matrisi

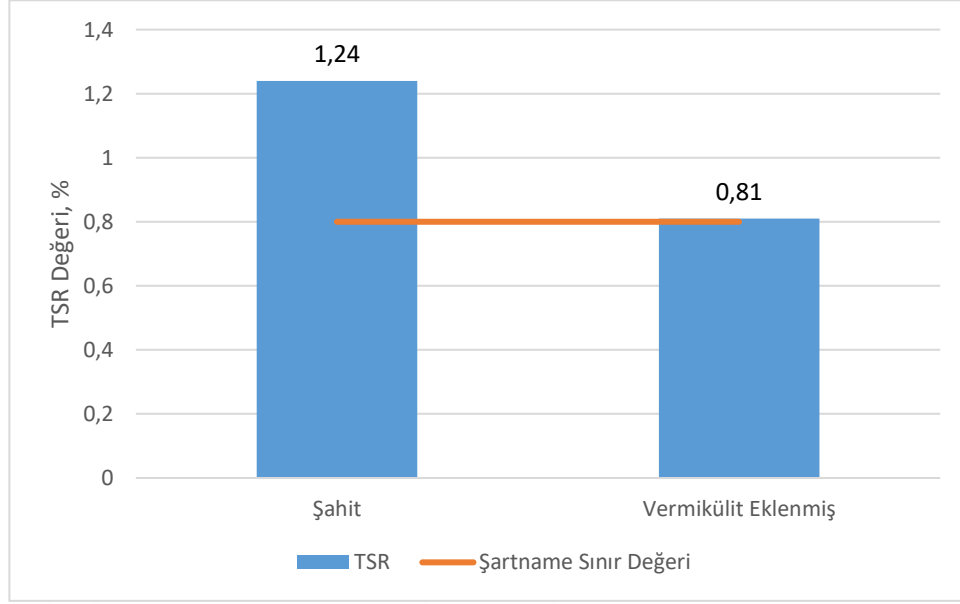
Kullanılan Bitüm (gram)	Kullanılan Vermikülit (gram)	Tekrar	Vermikülit Oranı %	Karışımın Bitüm Oranı
62.25	0	4	0	%5
53.25	9	4	% 14	%5

Bu numunelerin ITS_{KURU} değerleri ve ITS_{ISLAK} değerleri Şekil 4.12’ de verilmiştir.



Şekil 4.12. ITS_{KURU} ve ITS_{ISLAK} deney sonuçları

TSR için Denklem 3.20 kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi %14 vermikülit mofiyeye bitüm %80 TSR oranının üzerindedir ve şartnameyi sağlamaktadır.



Şekil 4.13. TSR deney sonuçları

4.4. Vialit deney sonucu

Bu deneyde marshall stabilite deneyinden elde edilen sonuçlara göre en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı numuneler kullanılmıştır. %14 vermikülit katkısına göre 5,6 gr vermikülit 34,4 gr bitüm karıştırılmıştır. Şahit numunesi için de 40 gr bitüm kullanılmıştır. Vialit deney sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Vialit deney sonuçları

Numune Adı	Düşen Agrega %	Ortalama Düşen Agrega %
Şahit 1	2	4.66
Şahit 2	5	
Şahit 3	7	
Vermikülit 1	2	5.33
Vermikülit 2	6	
Vermikülit 3	8	

Vialit deneyinin sonuçları çizelgede görüldüğü gibi 500 gr ağırlığında bilye düşürüldükten sonra katkısız bitümde düşen agrega yüzdesi %4.66, %14 vermikülit katkılı bitümde %5.33’ tür. Her iki koşul da şartname sınır değerini sağlamaktadır.

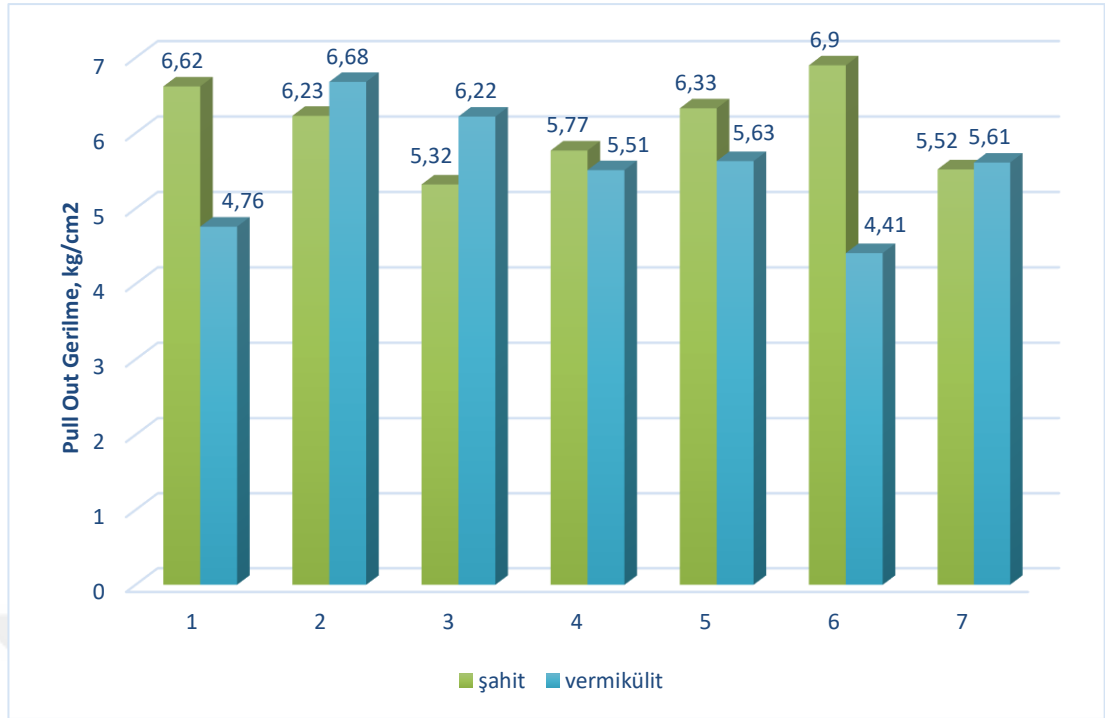
Fakat vialit deneyleri sonucunda vermikülitin bitümün yapışmasına katkısı olduğu söylenemez.

4.5. Çekip-çıkarma (Pull out) deney sonucu

Bu deneyde şahit numune için 111 gr bitüm ve mMarshall stabilite deneyinden elde edilen sonuçlara göre en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı numuneler kullanılmıştır. %14 vermikülit katkısına göre 15.54 gr vermikülit 95.46 gr bitüm karıştırılarak numune hazırlanmıştır. Çekip-çıkarma (Pull out) deneyi sonuçları Çizelge 4.5’de ve grafiksel olarak da Şekil 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çekip-çıkarma (Pull out) deney sonuçları

Numune adı	Kg/ cm ²	Ortalama
Şahit 1	6.62	6.09
Şahit 2	6.23	
Şahit 3	5.32	
Şahit 4	5.77	
Şahit 5	6.33	
Şahit 6	6.9	
Şahit 7	5.52	
Vermikülit 1	4.76	5.54
Vermikülit 2	6.68	
Vermikülit 3	6.22	
Vermikülit 4	5.51	
Vermikülit 5	5.63	
Vermikülit 6	4.41	
Vermikülit 7	5.61	



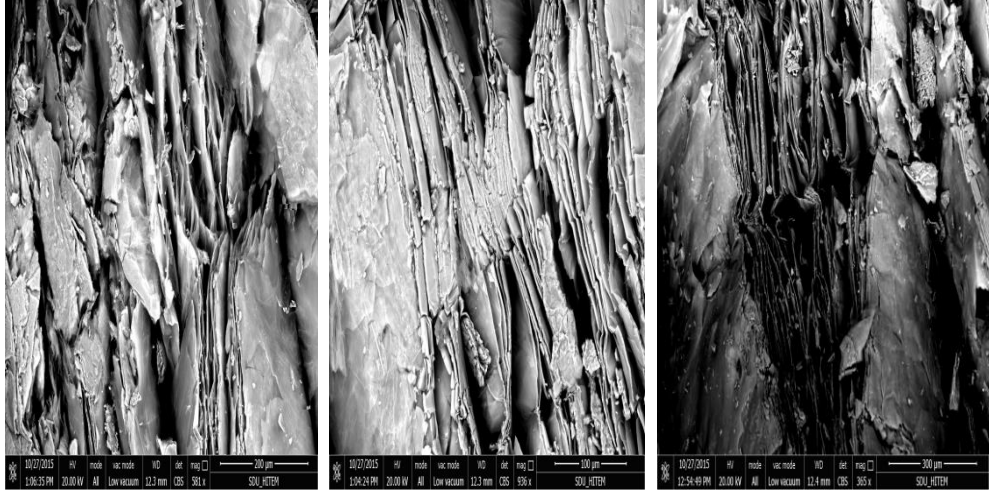
Şekil 4.14. Çekip-Çıkarma deney sonuçları grafiği

Çekip çıkarma deneyinin sonuçları Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Agregaların maksimum kopma kuvvetleri deney cihazından okunmuş ve agregaya yüzey alanları ise AutoCAD ortamında ölçülmüştür.

Kuvvet/alan formülünden her agreganın çekme gerilmesi değeri hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır. Katkısız bitümden agregayı çekerken oluşan ortalama kuvvet değeri 6.09 kg/cm², %16 vermikülit katkılı bitümde oluşan ortalama kuvvet değeri 5.54 kg/cm²’dir. Bu değerlere göre şahit numunesi, %14 vermikülit katkılı bitüme göre daha iyi yapışma sağlamıştır. Yine de 5.54 kg/cm² değeri kötü bir değer değildir. Fakat vermikülitin agregaya bitüm adezyonunu artırıcı etki göstermediği görülmektedir.

4.6. Vermikülitin SEM görüntüsü

Çalışmada kullanılan genişletilmiş vermikülitin SEM görüntüsü Şekil 4.15’de görülmektedir.



Şekil 4.15. Vermikülit SEM Görüntüleri

Şekil 3.1’de vermikülitin küçük yaprakçıklara ayrılan kristalize ve boşluklu yapısı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, vermikülitin asfalt karışımındaki davranışı araştırılmıştır. Bu çalışma vermikülit kullanılarak standart bir asfalt beton karışımının davranışındaki değişikliği belirlemek için bir ön çalışma niteliğindedir. Vermikülit modifiye bitüm için ön çalışma yapılmış ve öncelikle agregaya veya bitüme ilave etmenin etkilerine bakılmıştır. Marshall Stabilite deneyleri yapılarak vermikülitin bitüme katkısının daha iyi sonuçlar verildiği gözlemlenmiştir. Bu ön çalışmanın sonucunda vermikülitin bitüme ilave olarak çalışmalar yapılmasına karar verilmiştir.

Vermikülit katkılı asfalt karışımının mekanik özelliklerinde gelişmeler elde etmek için Marshall Stabilite, indirekt çekme, vialit ve çekip-çıkarma (Pull out) deneyleri yapılmıştır.

Çalışmalarda karışımda kullanılacak aynı granülometri eğrisine sahip kireçtaşı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde Marshall Stabilitesi için kullanılan optimum bitüm yüzdeleri (%5) belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında; vermikülit oranları bitüm ağırlığı yüzdesi (%5) baz alınarak hazırlanmıştır.

Marshall Stabilite deneyi sonuçları incelendiğinde %9, %13 ve %14 vermikülit katkılı bitümler şahit numuneye göre daha iyi sonuç vermiştir. Vermikülit modifikasyonunun Marshall Stabilite değerini artırdığı görülmektedir. Akma değerlerine bakıldığında tüm vermikülit katkılı bitümlerin sınır değerler arasında kaldığı görülmektedir. Mineral agregalar arası boşluk oranı (VMA) incelendiğinde hiçbir numunenin şartname sınır değerlerini (14-16) sağlamadığı ve vermikülitin agregalar arası boşluk oranını artırdığı görülmektedir. Bitümle kaplı boşluk oranı (Vf) değerleri incelendiğinde hiçbir numunenin şartname sınır değerlerini (65-75) sağlamadığı ve vermikülitin bitümle kaplı boşluk oranını artırdığı görülmektedir. Hava boşluk oranı incelendiğinde hiçbir numunenin şartname sınır değerlerini (3-5) sağlamadığı ve vermikülitin hava boşluk oranını artırdığı görülmektedir. Marshall stabilite deneyi sonucunda vermikülit katkısı, agregaların bitüm ile kaplanmasında olumsuz etki yaratmıştır ve boşluk oranlarını artırması vermikülitin karışımda agrega etkisi yarattığını göstermektedir. Fakat Marshall Stabilite değerine göre vermikülitin

bitüme katkı malzemesi olarak kullanılabilceği görülmektedir. Deney sonuçlarına göre optimum vermikülit katkısı oranı %14 olarak belirlenmiştir.

Marshall Stabilitate deneylerinde en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı bitüme indirekt çekme deneyi uygulanmıştır. İndirekt çekme mukavemeti Şartname sınır değeri %80'dir. Vermikülit modifiye bitüm TSR değeri %81'dir ve şartname değerini sağlamaktadır. Bu deney vermikülitin bitüm katkısı olarak kullanılabilceğini göstermiştir ve vermikülit katkılı BSK' nın neme karşı dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

Marshall Stabilitate deneylerinde en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı bitüme vialit deneyi birçok kez uygulamıştır ve bu tezde en iyi sonucu veren numunelerin değerleri yazılmıştır. Vermikülit katkılı bitüme vialit yapışma deneyi uygulamasında vermikülitin katı malzeme olmasından dolayı BSK'da agregata etkisi yarattığı görülmüştür. Deneyde katkısız bitümde düşen agregata yüzdesi %4.66, %14 vermikülit katkılı bitümde düşen agregata yüzdesi %5.33' tür Bu deney sonucunda vermikülit modifikasyonunun agregata-bitüm adezyonuna olumlu etkilediği söylenemez.

Marshall Stabilitate deneylerinde en iyi sonucu veren %14 vermikülit katkılı bitüme Çekip-çıkarma (Pull out) deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda katkısız bitümden agregatı çekerken oluşan ortalama kuvvet değeri 6.09 kg/cm², %14 vermikülit katkılı bitümde oluşan ortalama kuvvet değeri 5.54 kg/cm² olmuştur. Bu değerlere göre vermikülitin agregata bitüm adezyonunu artırıcı etki göstermediği görülmektedir.

Tüm deneyler incelendiğinde geliştirilmiş vermikülit modifikasyonunun Marshall Stabilitate değerini artırdığı belirlenmiştir. Bitüm-agregata adezyonunu ise önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir. Geliştirilmiş vermikülitin BSK'da bitüm kullanımını azaltıcı etki göstereceği görülmektedir. BSK'larda %14 vermikülit modifiye edilmiş bitümün kullanılması durumunda, BSK'da bitüm kullanımının %8 oranında azalacağı görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada geliştirilmiş vermikülitin karayolu esnek üstyapıları BSK'larında katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir. Ayrıca vermikülit agregata ilave olarak kullanılabilir. Geliştirilmiş vermikülit ince agregata

olarak farklı çaplarda denenebilir. Genleştirilmiş vermülitin polimer katkıli BSK'larda kullanılabilirliğide araştırılabilir. Bu alışmada SBS veya EVA gibi kimyasal ve maliyeti artıran katkı malzemeleri yerine organik, ülkemizde kolay bulunabilecek ve maliyeti azaltacak bir malzeme üzerine çalışma yapılmış ve oldukça iyi sonuçlara ulaşılabileceği belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., Kuloğlu, M., 2007. Epoksi Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlerin Fiziksel Özellikleri Üzerinde Yaşlanmanın Etkisi. Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., 19(2), 147-154.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., 2007. Stiren-Butadien-Stiren Modifikasyonunun Bitümlü Bağlayıcıların Isı Duyarlılığı, Rijitlik ve Yaslanma Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Süleyman Demirel Üniv. Fen Bil. Der., 11(3), 232-238.
- Ahmetzade, P., Alataş, T., Geçkil T., 2008. Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı. İMO Teknik Dergi, 4493-4507, Yazı 297.
- Airey, G.D., 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Strene Polymer Modified Road Bitumens. Fuel, 82(14), 1709-1719.
- Akbulut H., Gürer C., İçağa Y., 2003. Atık Agregaların Asfalt Yol Kaplamalarında Tekrar Kullanım İmkanları ve CEN Standartları. 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık, İstanbul, 271-276.
- Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S., Yadollahi, G., 2011. Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction. Construction and Building Materials, 25, 1379-1387.
- Aras, A., 1984. Malatya-Darende-Kuluncak-Darîh vermikülit zuhuru jeoloji raporu. MTA Rap. No:1725.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., Çubuk M., 2011. Improvement of Bitumen and Bituminous Mixtures Performances by Triethylene Glycol Based Synthetic Polyboron. Construction and Building Materials, 25(10), 3863-3868.
- ASTM C 127-88, 1992. Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM C 128-88, 1989. Standard Test Method for Density, Relative Density (specific gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 131-89, 1992. Test Method for Resistance to DEgradation of small-size Coarse Aggregates by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Annual book ASTM Standards USA.
- ASTM D 1559-89, 1992. Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D113, 1992. Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards USA.

- ASTM D36, 1992. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D5, 1992. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D5-97, 2003. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D6931-12, 2012. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D70, 1992. Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D92, 1992. Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. Annual Book of ASTM Standards USA.
- Çelik, O.N., 2001. The Fatigue Behaviour of Asphaltic Concrete Made with Waste Shredded Tire Rubber Modified Bitumen. Turk J Engin and Environ Sci, 25, 487-495.
- Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M.K., Arslan, D., 2013. Bitümün Özelliklerinin Organik Esaslı Magnezyum Katkı Maddesi ile Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28, 257-264.
- Gonzales, O., Munoz, M.E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F.J., Partal, P., 2004. Rheology and Stability of Bitumen/EVA Blends. European Polymer Journal, 40(10). 2365-2372.
- Gürer, C., 2010. Sathi Kaplamaların Performansına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi ve Performans Modeli Geliştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 83-86, Isparta.
- Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013. Ankara.
- Loughbrough, R., (1991). Minerals in Lightweight Insulation:Filling the Market. Industrial Minerals, October, 21-35.
- Manh, H., T., Viet A., P., 2013. Influence Of Fiber Polymer Reinforced Asphalt Concrete Pavement In High Temperature Environment. The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference, Vietnam, 465-468.
- Meisinger, C. A., (1985). Vermiculite. Mineral Facts and Problems, US Bureau of Mines(1), 917-922.
- Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F.,Valencia, C., Gallegos, C., 2002. Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens. Chemical Engineering Journal, 89,53-61.

- Nejad, M.F., Aghajani, P., Modarres, A., Firoozifar, H., 2012. Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials*, 26, 481-489.
- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., 2006. Improving the Aging Resistance of Asphalt by Addition of Zinc Dialkyldithiophosphate. *Fuel*, 85, 1060-1066.
- Önal, M., A., Kahramangil, M., 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Potter, M. J., 2002. Vermiculite. *US Geological Survey Minerals Yearbook*, 1-6., New York.
- Rau, E., (1985). Vermiculite. *Mineral Processing Handbook*. SME, 29, 21-22p. New York.
- Selçuk Üniversitesi, 2016. Erişim Tarihi: 13.09.2016. <https://www.selcuk.edu.tr>
- Strand, P. R., (1983). Vermiculite. Lefond, S. J. AIME. (Ed.), *Industrial Minerals And Rocks (1375-81)*, SME, United States.
- Suo, Z., Wong, W.G., 2009. Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete material in wearing course. *Construction and Building Materials*, 23, 462-468.
- Toksoy, F., 1997. Vermikülit: Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir, 123-139.
- Türkiye Asfalt Endüstrisi Raporu, 2006. Erişim Tarihi: 13.09.2016. <http://www.asmud.org.tr>
- Tüpraş, 2016. Erişim Tarihi: 13.09.2016. <https://www.tupras.com.tr>
- Umar, F., Açar, E., 1991. Yol Üst Yapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 339, İstanbul.
- Widyatmoko, I., Elliott, R., 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts. *Construction and Building Materials*, 22, 239-249.
- Yang, X., You, Z., 2015. High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphaltbinders using the DSR and MSCR tests. *Construction and Building Materials*, 76, 380-387.
- Zhang, H., Yu, J., Kuang, D., 2012. Effect of expanded vermiculite on aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 26, 244-248.

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. *Construction and Building Materials*, 40, 224–230.

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.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Fahriye UYSAL
Doğum Yeri : Burdur
Doğum Tarihi : 10.07.1991
Yabancı Dil : İngilizce
E-Posta : fahriyeuysal91@gmail.com



Eğitim Durumu

Lisans Süleyman Demirel Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
2009 – 2013
Lise Burdur USO Anadolu Lisesi&Çağlayan Lisesi
2005 – 2009

Mesleki Deneyim

Statik Proje Mühendisi 2013-2015
Kesin Hesap Mühendisi 2016