

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

**KARBON FİBERLERİN ASFALT KARIŞIMLARDA KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

Özge DEMİRKAYA

**Danışman
Prof. Dr. Serdal TERZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



© 2016 [Özge DEMİRKAYA]

TEZ ONAYI

Özge DEMİRKAYA tarafından hazırlanan "**Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Prof. Dr. Serdal TERZİ**
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Mehmet SALTAN**
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Yrd. Doç. Dr. Volkan Emre UZ**
Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Enstitü Müdür V. 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.

Özge DEMİRKAYA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ÖZETİ	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Materyal.....	11
3.1.1. Agregada ve gradasyon	11
3.1.2. Bitüm.....	11
3.1.3. Karbon fiber.....	11
3.2. Metot	12
3.2.1. Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi	12
3.2.1.1. İri agregada için özgül ağırlık deneyi.....	12
3.2.1.2. İnce agregada için özgül ağırlık deneyi.....	13
3.2.1.3. Sıkışık birim hacim ağırlık deneyi.....	13
3.2.1.4. Gevşek birim hacim ağırlık deneyi.....	14
3.2.2. İnce madde oranının yıkama ile tayini	15
3.2.3. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agregada gradasyonunun belirlenmesi	15
3.2.4. Los Angeles aşınma dayanımını tespiti	16
3.2.5. Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri	17
3.2.5.1. Penetrasyon deneyi.....	17
3.2.5.2. Özgül ağırlık deneyi.....	17
3.2.6. Marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması	18
3.2.7. Çalışmada kullanılan diğer bağıntılar	19
3.2.7.2. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi.....	19
3.2.7.3. Sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması	20
3.2.8. Marshall stabilite deneyi	20
3.2.9. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi.....	22
3.2.10. Dolaylı çekme deneyi.....	23
3.2.11. Koşullandırılmış dolaylı çekme mukavemeti ve elastisite modülü..	23
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	26
4.1. Mineral Agreganın Fiziksel Özellikleri	26
4.1.1. Gevşek sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları	26
4.2. Los Angeles Aşınma Dayanımının Tespiti	27
4.3. Numunelerde Kullanılacak Agregada Gradasyonu	27
4.4. Kireçtaşı Optimum Bitüm Yüzdesi	28
4.5. Karbon Fiberli Marshall Stabilite Deney Numunelerinin Hazırlanması	31
4.5.1. Karışım tasarımı	31
4.5.2. Karbon fiber ve asfalt binder karışımı	32
4.5.3. Marshall stabilitesi ve akma	33
4.6. Dolaylı Çekme Deney Numunelerinin Hazırlanması	38

4.6.1. Karışım tasarımı	38
4.7. Koşullandırılmış Dolaylı Çekme Deney Numunelerin Hazırlanması	40
4.8. Elastisite Modülü	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	42
KAYNAKLAR.....	44
ÖZGEÇMİŞ	47



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON FİBERLERİN ASFALT KARIŞIMLARDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Özge DEMİRKAYA

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Serdal TERZİ

Asfalt kaplamalarının performansını artırma çalışmaları son yıllarda önem kazanmıştır. Asfalt bağlayıcı modifikasyonu kaplama performansını iyileştirmek için uygulanan bir yöntemdir. Bağlayıcı modifikasyon yöntemlerinden biri de bağlayıcıya karbon fiber eklenmesidir.

Bu çalışmada karbon fiber katkılı asfalt karışımların davranışını araştırmak için belli oranlarda kırılmış karbon fiber kullanılarak asfalt betonu karışımlar üretilmiş ve test edilmiştir. Bu çalışmada, karbon fiber katkılı asfalt betonu karışımının mekanik özelliklerinin ve stabilitesinin artırılması amaçlanmıştır.

Asfalt betonu karışımlara 3 farklı uzunlukta (3, 6 ve 12 mm) kırılmış karbon fiberler farklı oranlarda karıştırılarak en iyi mekanik özellik gösteren uzunluk ve oran elde edilmiştir.

Marshall stabilite deneyi sonucunda en iyi mekanik değeri % 0.5 oranındaki 12mm uzunluğundaki karbon fiberli asfalt karışımının verildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Fiber, Asfalt Karışımı, Modifiye Asfalt.

2016, 47 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE USED OF CARBON FIBERS USED IN ASPHALT MIXTURES

Özge DEMİRKAYA

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Construction Education**

Supervisor: Prof. Dr. Serdal TERZİ

Scientists and engineers are constantly trying to improve the performance of asphalt pavements. Modification of the asphalt binder is one approach taken to improve pavement performance. Because of their inherent compatibility with asphalt cement and excellent mechanical properties, carbon fibers might offer an excellent potential for asphalt modification.

In this study, asphalt concrete mixtures were produced by using in certain proportions of trimmed carbon fiber and tested to investigate the behavior carbon fiber modified asphalt mixtures. This study was conducted to obtain significant improvements in stability and mechanical properties of carbon fiber reinforced asphalt concrete mixture.

The length and ratio which show the best mechanical properties were obtained by preparing asphalt mixture using 3 different (3, 6 and 12 mm) trimmed carbon fibers at different rates.

In consequence of Marshall test, 12mm length at ratio % 0.5 carbon fiber asphalt mixture was determined as the best value.

Keywords: Carbon Fibers, Asphalt Mixtures, Modified Asphalt

2016, 47 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Serdal TERZİ' ye teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarında bana ulaştırma laboratuvarının kapılarını açan ve yardımcı olan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet SALTAN' a, Arş. Gör. Şebnem KARAHANÇER'e, Arş. Gör. Ekinhan ERİŞKİN'e ve Uzm. Buket ÇAPALI'ya, çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Bahram Ali SAJJADI'ye sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

3901-YL1-14 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Özge DEMİRKAYA
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Marshall stabilite deney aleti.....	21
Şekil 3.2. Marshall stabilite deney tokmağı.....	22
Şekil 3.3. Dolaylı çekme deney aleti.....	25
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan agreganın gradasyon limitleri.....	28
Şekil 4.2. Karışımın stabilite-bitüm ilişkisi.....	29
Şekil 4.3. Karışımın birim ağırlık-bitüm ilişkisi	30
Şekil 4.4. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm ilişkisi	30
Şekil 4.5. Karışımdaki boşluk hacmi-bitüm ilişkisi	31
Şekil 4.6. Karbon Fiber, Bitüm ve Agreganın Harmanlanması	33
Şekil 4.7. Karbon Fiber SEM Görüntüleri, sırası ile 3mm, 6mm ve 12 mm.....	33
Şekil 4.8. Marshall Numuneleri.....	34
Şekil 4.9. Marshall stabilite değerleri.....	35
Şekil 4.10. Akma değerleri.....	35
Şekil 4.11. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi değerleri	36
Şekil 4.12. Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki agreganın boşluğu değerleri	36
Şekil 4.13. Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlık değerleri	37
Şekil 4.14. Sıkıştırılmış karışımın pratik özgül ağırlık değerleri	38
Şekil 4.15. Dolaylı Çekme Değerleri.....	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Satış cinsine göre yol ağı (km) (KGM, 2015).	2
Çizelge 3.1. Karbon fiber özellikleri (http://www.dostkimya.com/)	12
Çizelge 4.1. Çalışmada agrega olarak kullanılan iri ve ince kireçtaşı malzemesinin özellikleri	26
Çizelge 4.2. Çalışmada agrega olarak kullanılan ince ve iri kireçtaşı malzemesinin birim hacim ağırlık değerleri	27
Çizelge 4.3. Kireçtaşı Los Angeles deneyi sonuçları.....	27
Çizelge 4.4. Agrega karışımı verileri.....	28
Çizelge 4.5. Bitüm özellikleri.....	29
Çizelge 4.6. Karbon fiber çalışma matrisi.....	32
Çizelge 4.7. Marshall stabilite ve akma sonuçları.....	34
Çizelge 4.8. Dolaylı çekme için karbon fiber matrisi	39
Çizelge 4.9. Dolaylı çekme deney sonuçları	39
Çizelge 4.10. ITS _{KURU} ve ITS _{ISLAK} deney sonuçları	41
Çizelge 4.11. TSR deney sonuçları	41
Çizelge 4.12. Elastisite modülü deney sonuçları	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
AC	Asfalt Çimentosu
BBR	Eğilme Kirişi Reometresi
cm	santimetre
cm ²	santimetrekare
dk	Dakika
dm ³	Desimetreküp
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
D _T	Karışımın maksimum özgül ağırlığı
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/cm ³	kilonewton/santimetre küp
LAV	Los Angeles aşınma değeri
mm	milimetre
MPa	Megapascal
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
sn	saniye
TSR	Tensile strength Ratio (Çekme Mukavemeti Oranı)
V _f	Asfaltla dolu boşluk
VFA	Asfaltla dolu boşluk yüzdesi
V _h	Karışımındaki agrega boşluğu
VMA	Agregalar arası boşluk yüzdesi
W _a	Agreganın ağırlıça yüzdesi
%	Yüzde
°C	Santigrad derece

1.GİRİŞ

Osmanlı İmparatorluğu'nun yükseliş döneminde ihtiyaca cevap verebilecek bir yol ağı geliştirilmiş ve bu yol ağı uzun süre korunmuştur. Ancak, İmparatorluğun son dönemlerinde, o zamana kadar başarılı olan yarı askeri özellikteki Karayolları organizasyonu, yolları ihmal etmeye başlamış ve yollar bakımsız kalmıştır (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015).

1923 yılında kurulan Türkiye Cumhuriyeti 4 000 km si iyi durumda olan 18 350 km yol ağı devralmıştır. Cumhuriyetin ilk yıllarında ulaşım, dönemin en çağdaş teknolojisi olarak kabul edilen demiryolu yapımı ağırlık kazanmış, ancak bir süre sonra demiryolunun tek başına yeterli olmadığı, sistemin ucundaki ulaşım için karayoluna ihtiyaç olduğu görülerek, 1929 yılında Nafia Vekaleti (Bayındırlık Bakanlığı) içinde Şose ve Köprüler Reisliği kuruldu ve çıkarılan yol kanunu ile karayolu yapım çalışmalarına hız verilmiştir. Uzun süren savaş döneminin getirdiği sıkıntılar, dünya ekonomik krizi ve II. Dünya Savaşından sonra, karayolu çalışmaları için yeni bir atılma ihtiyaç duyulmuştur. (KGM, 2015).

Karayolu atılımını işaret eden yıl 1948'dir. Bu zamana kadar bakım çalışmaları üzerinde durulmaksızın bir karış daha fazla yol yapmakla işin bitmediğinin, önemli olanın yapılan yolların devamlı bakım altında bulunması olduğunun altı çizilmiştir. Bu, aynı zamanda makinalı çalışma dönemine geçiş demektir. Öyle ki, Cumhuriyet dönemindeki yol tarihimizi, kazma, kürek ve insan gücüne dayanan 1948 yılı öncesi dönem ve 1948 yılından sonraki Makinalı Çalışma Dönemi olarak ikiye ayırabiliriz (KGM, 2015). Çizelge 1.1'de satıh cinsine göre mevcut yol ağı (km) görülmektedir.

Çizelge 1.1. Satış cinsine göre yol ağı (km) (KGM, 2015).

Yol Tipi	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Geçit Vermez	Toplam
Otoyol	2 155	-	-	-	-	-	2 155
Devlet Yolları	13 446	17 415	72	67	29	251	31 280
İl Yolları	2 476	26 962	201	824	570	1 541	32 474
TOPLAM	18 077	44 277	273	891	599	1 792	65 909

Esnek kaplamalarda, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesine paralel olarak artan trafik hacmi ve dingil yükleri, üretim hataları, yetersiz bakım ve iklim koşulları etkisi altında tekerlek izi oluşumu, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları ve suya karşı duyarlılık gibi bozulmalar oluşmakta bu da yolun öngörülen ömür ve konfor düzeyini düşürmektedir. Bu durum, mevcut asfalt malzemesinin özelliklerini artırmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Asfalt malzemesi, mineral agrega, filler, bitüm ve havadan oluşan çok fazlı kompleks bir malzemedir. Asfalt-agrega karışımlarında agreganın belirli bir miktar filler ihtiva etmesi, arzu edilen karışım özelliklerini ve performansını sağlamak için şarttır (Ahmetzade vd., 2008).

Bu çalışma asfalt betonu karışımının modifikasyonu ile bağlayıcı performansını iyileştirmek için yapılmıştır. Karbon fiberin asfalt karışımına eklenirken malzeme dayanımı ve fiziksel özelliklerini geliştirmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, amaç ve önemden bahsedilmiş, ikinci bölümde konu ile ilgili literatüre yer verilmiştir. Üçüncü bölümde materyal olarak kullanılan agrega, bitüm ve karbon fiber malzemesi ile deneysel çalışmada kullanılan yöntemler hakkında bilgi sunulmuştur. Araştırma bulguları bölümünde ise, çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Beşinci bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2.KAYNAK ÖZETİ

Asfalt karışımlarında karbon liflerin kullanımı konusunda sınırlı sayıda uygulama mevcuttur. Bu bölümde, literatürde var olan ilgili çalışmalar özetlenecektir.

Zube çalışmasında asfalt karışımların takviyesi üzerinde bilinen en eski çalışmayı 1956 yılında yayınlamıştır. Bu çalışma yansıma çatlaklarını önlemek amacıyla asfalt kaplama altına tel örgü uygulaması hakkındadır. Boyuna tel takviye uygulaması ile çatlak oluşumu önlenebileceği veya büyük ölçüde geciktirebileceği sonucuna varmıştır. Zube, tel donatı bindirme kalınlığı azaltılarak aynı performansın sağlanabileceği sonucunu elde etmiştir. Çelik - asfalt karışımı uyumluluğunda herhangi bir sorun gözlenmemiştir (Zube, 1956; Cleven, 2000).

Serfass ve Samanos (1996)' un çalışmasında asbest, taş yünü, cam yünü ve selüloz lifleri kullanarak modifiye asfaltta lif etkisi incelenmiştir. Testler esneklik modülü, düşük sıcaklık doğrudan gerilimi, yorulma direnci dahil olarak gerçekleştirilen üç çalışma Nantes, Fransa test yolunda yapılmıştır.

Serfass ve Samanos çalışmalarının sonucunda asfalt betona liflerin eklenmesinin karışımda asfalt bağlayıcının özelliklerini geliştirdiği sonucuna varmışlardır. Lif modifikasyonun film kalınlığındaki artışı aynı zamanda daha az yaşlanmış ve özellikleri iyileştirilmiş bağlayıcı sağlamıştır. Liflerinin aynı zamanda asfalt karışımlarının sıcaklığa duyarlılığında azalma görülmüştür. Lif eklenmesi ile neme karşı yüksek direnç yanında, yaşlanma, yorulma ve çatlama azalmanın sağlandığı ifade edilmiştir (Serfass ve Samanos, 1996; Cleven, 2000).

Cleven (2000), çalışmasında, bir kırılma mekaniği yaklaşımı çatlak direnci üzerinde lif takviye etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Poliester ve polipropilen lifler, esneklik modülü, kırılma enerjisi ve çekme mukavemeti için karışımları değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Modifiye örneklerinde

kırılma enerjisi yüzde 50-100 arasında artmıştır. Esneklik ve çekme dayanımı sonuçları önemli ölçüde etkilenmemiştir

Fitzgerald (2000), yaptığı tez çalışmasında karbon fiberlerin asfalt betonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmalarında karbon fiberlerin elektrik iletkenliğine odaklanmıştır.

Ahmetzade vd. (2008), tarafından yapılan çalışmada siyah karbonun asfalt betonunda filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- AC 75-100 asfaltı ve siyah karbon fillerin bozulma başlangıç sıcaklıkları, termogravimetrik analizden elde edilen sonuçlara göre asfalt betonu numunesinin hazırlama ve karıştırma sıcaklığından daha yüksek çıkmıştır.
- Marshall stabilitesi ve akma deneyi sonuçları, siyah karbon fillerini içeren asfalt betonu karışımların kalker fillerini içeren karışımlardan daha iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir.
- Kontrol ve siyah karbon fillerini içeren asfalt betonu karışımların 0°C ve 20°C sıcaklıklardaki Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (Indirect Tensile Stiffness Modulus -ITSM) deney sonuçları birbirine yakın elde edilmiştir. Ancak, AC 75-100/SK karışımların 40°C'deki rijitlik modülü değeri AC 75-100/K karışımlarından önemli ölçüde yüksek bulunmuştur. Siyah karbon içeren asfalt betonu karışımların sünme sertliği deney sonuçları kalker fillerini içeren karışımlardan çok daha yüksek çıkmıştır.
- Siyah karbon fillerli asfalt betonu karışım numunelerinin şartlandırılmış ve şartlandırılmamış indirekt çekme direnci değerleri, kalker fillerini içeren numunelerden daha yüksek elde edilmiştir. Bu değerler, bitümlü sıcak karışımlara siyah karbon ilave edilmesinin karışımın tekerlek izi oluşumu ve nem hasarına karşı direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Siyah karbon, asfalt bağlayıcı ve agregalar arasındaki bağın güçlenmesine katkıda

bulunarak suyun asfalt malzemeye zarar vermesini engellemiş ve karışımın rijitliğinin artmasını sağlamıştır. Bitümlü sıcak karışımlarda karışımın ana bileşenlerinden biri olarak dikkate alınan kalker filler malzemesi yerine aynı amaçla siyah karbon kullanılmasının, asfalt betonunun performansını geliştirdiği, özellikle de sıcak karışımın stabilitesini ve durabilitesini artırarak ötelenme ve tekerlek izi oluşumu ile ilgili sorunları azalttığı deney sonuçlarında görülmüştür. Sonuç olarak, siyah karbonun asfalt betonu karışımlarda filler olarak kullanılmasının, karışımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği tespit edilmiştir (Ahmetzade vd., 2008).

Karbon fiber takviyeli asfalt karışımların mevcut karakteristiği ve özellikleri yolun performansını artırabilir. Laboratuvar incelemeleri lifli ve liffsiz numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada Marshall testi, indirekt çekme testi, akma testi, tekrarlanan indirekt çekme testiyle yorulma çatlağı gibi çeşitli testler yapılmıştır. Karbon fiber sonuçları tutarlılık sergilemiştir, böylece lif ilavesi bitümlü karışımların özelliklerini etkilediği gözlenmiştir, örneğin karışımdaki boşluk artışlarına ilaveten stabilitesinde artış, akma değerinde düşüş göstermiştir. Sonuçlar, lifler büyüyen trafik yükleri ardından, yolun yapısal sıkıntısına karşı potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir ve böylece çatlak veya kalıcı deformasyona karşı direnci arttırarak yorulmayı arttırır. Bütün sonuçlar karbon fiber ilaveli esnek üstyapıda, yorulma ve deformasyon gibi bazı mekanik özellikleri arttıracığını göstermiştir. Artan stabilite ve boşluk ve azalan akmaya göre fiber ilaveli bitümlü karışımların özelliklerini uygun olarak etkilediği gözlenmiştir. Böylece, trafik yüklerinin esnek üstyapıda meydana getirdiği sıkıntılar nedeniyle karbon fiberin yolun performansını arttırma potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, toplam karışım üzerinden ağırlıkça yaklaşık % 0.4 lif içeriği kalıcı deformasyon ve yorulma direnci açısından yüksek performans ile sonuçlanmıştır; Ancak, aynı karışımda lif içeriği % 0.4 seviyesini aştığında karışımın bazı mekanik özellikleri bozulabilir(Ahmetzade vd., 2008).

Jahromi ve Khodaii (2008) karbon fiberli modifiye asfalt karışımlarının performansını etkileyen önemli faktörün lif uzunluğu olduğunu, karıştırma işlemi sonrası her bir fiberin doğrusal yapılanma bütünlüğünü korumasına dikkat edilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında belirtildiğine göre 20 mm fiber, karışımlarda faydalı özelliklerini kaybederek “topaklanma” olayına sebep olan uzun fiberlerden daha iyi mekaniksel davranış sergilemiştir. Modifiye karbon fiber karışımları sertlik, yorulma ömrü ve kalıcı deformasyon arasında iyi bir korelasyon gösteren tekerlek izi direncinde önemli artışlar göstermektedir. Sertlikteki bu artış doğrudan elyaf ilavesi ile bağlantılıdır. Ancak, onların ileri teknolojiye dahil üretimi nedeniyle, karbon elyaf kullanımını ekonomik değildir. (Jahromi ve Khodaii, 2008).

Chen vd. (2009), çalışmalarında fiber takviyeli asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özelliklerini araştırmak için dört farklı lif kullanmıştır: poliakrilonitril, polyester, kaya lifi, lignin ve asbest lifi. Marshall testleri asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özelliklerini ölçmek için yapılmıştır. Performans testleri de nem duyarlılığı ve dinamik kararlılığını incelemek için yürütülmüştür. Asfalt karışımlara fiber eklendikten sonra özgül ağırlıkta azalma; optimum bitüm içeriği, agrega boşluk oranında, asfaltla dolu boşluk oranında artış görülmüştür. Optimum bitüm içeriği, Marshall stabilite ve dinamik stabilite başta artmış, fiber artırıldığında azalmıştır. Polyester ve poliakrilonitril lifleri yüksek ağ etkileri nedeniyle yüksek stabiliteye sahipken lignin ve asbest lifleri yüksek asfalt anisotropileri nedeniyle yüksek optimum asfalt içeriğine ve VFA (asfaltın mineral agrega boşluklarını doldurması)’ ya sebep olur. Elyaf takviyeli asfalt karışımlarıyla ilgili ortaya atılan lif türünün lif ve asfalt karışımının özelliklerine göre seçildiği bir tasarım yönteminde optimum asfalt içeriği Marshall yöntemine göre hazırlanır ve performans test sonuçları açısından optimum lif içeriği belirlenir. Test sonuçlarına göre, karışımdan kütle itibarıyla % 0.35 olan bir lif içeriği, bu çalışmada kullanılan polyester elyaf için tavsiye edilir (Chen vd., 2009).

Geçkil vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada ise, siyah karbonun bitümün tekerlek izi dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Siyah karbonun, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık altında tekerlek izine karşı dayanımına etkisinin araştırıldığı çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; B160/220 bağlayıcısına %5, %10 ve %15 siyah karbon ilave edilmesiyle hazırlanmış modifiye bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre duktilite ve penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama ve parlama noktalarında ise artış meydana gelmiştir. Bu durum, siyah karbon ilavesiyle bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü göstermiştir. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; katkısız bitümlere göre siyah karbon (SK) katkılı modifiye bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerlerinin, SK oranının artışıyla (özellikle %10 ve %15 SK) önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Bu yükselme, siyah karbonun bitümü sertleştirdiğini ve dolayısıyla deformasyonlara karşı bitümün direncini arttırdığını göstermektedir. SK ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerlerinin düşük olması, bu tür bağlayıcıların saf bitüme göre daha fazla elastik ögeye sahip olduğunu, bu nedenle daha fazla deformasyonun geriye dönmesine olanak sağladığını göstermektedir. DSR deneyleri sonucunda, siyah karbon katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametresi, katkısız bitüme göre daha yüksek çıkmış, dolayısıyla bitümün tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Bitüm modifikasyonunda siyah karbon kullanılması durumunda, özellikle yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde karışımların elastiklik özelliğinin ve tekerlek izine karşı dayanımının artacağı, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı bakım- onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha aza indireceği düşünülmüştür (Geçkil vd., 2011).

Manh ve Viet (2013), çalışmalarında karbon fiber, cam fiber ve selülozik fiberlerin farklı sıcaklıktaki (5, 25 ve 40°C) davranışlarını araştırmışlardır. Esneklik modülündeki artışın asfalt betonu dayanımını artırabildiği görülmüştür. Özellikle, yüksek sıcaklık koşullarında (40°C) yapılan deneyler sonucunda sıcak hava ve ağır trafik koşulları için fiber katkılı asfalt betonunun uygulanabileceği belirtilmiştir.

Çalışmada esnek üstyapılarda yüksek trafik etkisine doğrudan maruz kalan kaplama tabakalarında gerilmelerin karşılanmasını sağlayabilecek çelik liflerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda çalışmada kullanılacak agrega numuneleri ve bitüm üzerinde gerekli tüm deneyler yapılmıştır. Ampirik hesaplama yöntemleri kullanılarak ön optimum bitüm yüzdeleri tayin edilmiş ve bu bitüm yüzdesinin %0,5 ve %1 arttırıp azaltarak toplamda beş farklı bitüm yüzdesi (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, ve 6.5%), her bitüm yüzdesi için üçer adet olacak şekilde toplam on beş Marshall numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan on beş numune Marshall Stabilite deneyine tabi tutulmuş ve kullanılacak agrega numunesi için optimum bitüm yüzdesi tayin edilmiştir (5.5%). Tayin edilen optimum bitüm yüzdesi esas alınarak farklı bitüm (5% 5.5% 6%) ve lif (0%,0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%) oranları kullanılarak her lif oranı için üçer adet olacak şekilde numune dökülmüş ve tekrar Marshall Stabilite deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada en iyi sonucu 5.5% bitüm miktarında ve 0.75% fiber eklenmesiyle elde edilen numunelerin verdiği belirlenmiştir. (Serin vd., 2012).

Tapkın 2007, çalışmasında polipropilen fiberlerin bitümlü sıcak karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanımı ele alınmıştır. Bu çalışmaya esas oluşturacak temel karışım olarak kalkerli agrega ve 60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosundan oluşan yoğun bitümlü karışım seçilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde polipropilen fiber katkılı ve katkısız standart Marshall briketleri üzerinde ilk olarak standard stabilite ve akma deneyleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan bu deneyler sonucu görülmüştür ki, birçok denemeden sonra belirlenmiş olan yüzde değerinde katılan polipropilen fiberler, test edilen numunelerin Marshall stabilite değerlerini önemli oranda arttırırken, akma değerlerinde de dikkate değer düşüslere yol açmıştır. Böylece Marshall briketlerinin rijitlik modüllerinde kayda değer artışlar sağlanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise, yoğun bitümlü sıcak karışımlarda görülen yorulma çatlaklarının laboratuvar ortamında oluşumunun modellenip gözlenebilmesi amacıyla UMATTA test cihazı kullanılarak indirek yorulma testleri yapılmıştır. Karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesi bakımından, test şartları

polipropilen fiber katkı ve katkısız Marshall briketleri için sabit tutulmuştur. Elastik ve kalıcı birim deformasyonların incelenmesi, polipropilen fiber katkı Marshall briketlerinin laboratuvar yorulma ömürlerinin polipropilen katkısız Marshall briketlerine göre daha uzun olduğunu göstermiştir. Yapılan Marshall dizaynları ve endirek yorulma deneyleri sonucu göstermiştir ki karışımlara eklenen polipropilen fiberler asfaltın özelliklerini önemli oranda değiştirmişlerdir. Karışıma eklenen polipropilen fiber oranının artmasıyla beraber Marshall stabilite değerlerindeki artış %1 oranında katkıya gelindiğinde %29'a çıkmıştır. Akma değerleri ise %31 oranında azalmıştır. Yorulma ömürleri ise bu iki parametreye doğrudan bağlı bir şekilde ortalama %24 artmıştır. Polipropilen fiberlerin farklı özgül ağırlık ve de fiziko-kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı asfalt betonunda önemli fiziksel ve kimyasal değişikliklere yol açtığı son derece bariz bir gerçektir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığında asfalt-agrega karışımlara kuru bazda polipropilen ilave edilmesi, mekanistik özellikler göz önüne alındığında karışımlar üzerinde son derece pozitif bir etkiye sebep olmuştur. Bunun yanı sıra polipropilen fiber-bitüm pastasının farklı elastoplastik davranışlar göstermesi ve bağlayıcı özelliklerinin katkısız numunelerden değişik olması da ayrıca incelenmesi gereken bir konudur. Bu sebeple polipropilen fiberlerin direkt olarak bitüme eklenmesi ve modifikasyonun bitümlü bağlayıcı bazında yapılarak daha farklı katkı oranlarında yeni deneyler yapılması bundan sonraki çalışmalara uygun bir baz teşkil edebilir (Tapkın, 2007).

Bu çalışmada, Fiber Donatılı Asfalt Betonu – Fiber Reinforced Asphalt Concrete (FRAC) olarak esnek üstyapıda rastgele içeriklerle fiber kullanımının avantajları incelenmiştir. Asfalt betonu karışımlarında fiber kullanımı üç farklı amaca hizmet etmektedir: mekanik özelliklerin geliştirilmesi, elektriksel iletkenliği olan malzemeler hazırlamak ve atık tekstil fiberlerin kullanımı için yeni bir alan yaratmak. Genellikle, fiberler karışımın viskoelastikliğini değiştirmekte, dinamik modülünü, nem hassasiyetini, kayma gerilmesini, tekerlek izinde oturmaları ve donma-çözünme dayanımını geliştirmekte, aynı zamanda yansıma çatlaklarını azaltmaktadır. Bu özellikleriyle fiber içeren farklı türde malzemeler ayrı ayrı tartışılmıştır: Polypropylene, Polyester, Asbestos, Selüloz, Karbon, Cam ve

Naylon. Sonuç olarak, fiberleri sunmanın iki farklı metodu olduğu bulunmuştur: ıslak süreç ve kuru süreç. Genellikle kuru yöntemin bazı nedenlerle tercih edilmekte olduğu belirtilmiştir. Diğer yandan FRAC karışımlarının mekanik özelliklerinin modellenmesinde kompozit sistemler göz önüne alınmıştır. Son olarak, FRAC numunesi olarak fiberlerin yerleşiminin Scanning Electron Microscopy – Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ile incelenebileceği tavsiye edilmiştir (Abtahi vd., 2009).

Bu çalışmada, Polypropylene (PP) ve kısa cam fiber (SGF) ve kısa karbon fiber (SCF) donatılı kompozitler hazırlanmıştır. Bu kompozitlerin çekme özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, kompozit modülü için fiber etki oranının kompozit dayanımından daha fazla olduğu görülmüştür. Dahası, kompozitlerin çekme dayanımı gerilmesi fiber hacim oranı arttıkça azalmıştır (Fu vd., 2000).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Agregaya ve gradasyon

Çalışmada kullanılan agregalar Isparta belediyesi asfalt şantiyesinden elde edilmiştir. Karışımlar için nominal maksimum agregaya boyutu 9.5 mm ve Karayolu Teknik Şartnamesi aşınma tabakası standartları kullanılmıştır. Aşınma direnci "agregaya aşınma kaybı için (Los Angeles) standart test yöntemi" su emme için "agregaya su emme standart Test Yöntemleri, doymuş yüzey yerçekimi ve özgül ağırlık" nın belirlenmesi için testler karışımda kullanılan agregaya malzemesi üzerine yapılmıştır.

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 bitümlü malzemelerin süneklik standart test yöntemi (ASTM D113) kullanılmıştır.

3.1.3. Karbon fiber

Kırılmış karbon fiberler yüksek mekanik mukavemetleri, elektrik iletkenlikleri, termal mukavemetleri ile termoplastik enjeksiyon parçalarının mekanik olarak güçlendirilmesinde ve elektrik iletkenliği sağlanmasında; antistatik özellik istenen endüstriyel zeminlerde; yüksek aşınma dayanımı gereken fren balataları gibi ürünlerde sahip olduğu üstün özellikleri ile katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

(<http://www.dostkimya.com/tr/urun-gozat/karbon-elyaf-kirpilmis-/25>).

Çizelge 3.1’de genel olarak karbon fiber özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karbon fiber özellikleri (<http://www.dostkimya.com/>)

Test	Ortalama Değerler
Çekme dayanımı	3800 MPa
Elastisite modülü	228 GPA
Elektrik iletkenliği	0.00155 ohm-cm
Özgül ağırlık	1.81 gr/cc
Elyaf çapı	7.2 mikron

Karbon fiberlerin maliyeti literatürde 15-35 \$/kg olarak verilmektedir (Shanbara, 2014). Bu çalışma kapsamında elde edilen karbon fiberlerin kg bedeli 120 TL’dir.

3.2. Metot

3.2.1. Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

3.2.1.1. İri agrega için özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık değeri, genellikle portland çimentosu, asfalt betonu ve diğer karışımlarda kullanılan iri agreganın özelliklerini belirlemede kullanılır (ASTM C 128-88, 1989).

Kullanılan agrega örneğinden yaklaşık 1 kg alınır, 24 saat suda bırakılır. Sonra yüzeyleri bezle kurutulur ve tartılır. Bir tel sepete konarak suya batırılır ve suda tartılır. Daha sonra etüvde 105 °C’de 24 saat kurutulur ve havada tartılır (Umar ve Açar, 1991).

$$\text{Hacim özgül ağırlık (kN/cm}^3\text{)} = \frac{A}{B-C} \quad (3.1)$$

$$\text{Doygun esasa göre hacim özgül ağırlık (kN/cm}^3) = \frac{B}{B-C} \quad (3.2)$$

$$\text{Zahir özgül ağırlık (kN/cm}^3) = \frac{A}{A-C} \quad (3.3)$$

$$\text{Su emme yüzdesi (\%)} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

A= Kuru ağırlık (gr)

B= Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

C= Sudaki ağırlık (gr)

3.2.1.2. İnce agrega için özgül ağırlık deneyi

İnce agrega 24 saat suda bırakılır. Ertesi gün kohezyonunu kaybedinceye kadar kurumaya terk edilir. Sonra, bu haldeki malzemeden 500 gr alınır ve piknometreye konur ve üzerine piknometre doluncaya kadar su ilave edilir. Piknometre içindeki malzeme alınır ve etüvde kurutulur, sonra da tartılır. İnce agreganın özgül ağırlık aşağıdaki gibi hesaplanır (Umar ve Açar, 1991).

$$\text{Hacim özgül ağırlık (kN/cm}^3) = \frac{A}{V-W} \quad (3.5)$$

$$\text{Doygun esasa göre hacim özgül ağırlık (kN/cm}^3) = \frac{500}{V-W} \quad (3.6)$$

$$\text{Zahir özgül ağırlık (kN/cm}^3) = \frac{A}{[V-W-(500-A)]} \quad (3.7)$$

$$\text{Su emme yüzdesi (\%)} = \frac{500-A}{A} \times 100 \quad (3.8)$$

A= Kuru ağırlık (gr)

V= Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

W= Sudaki ağırlık (gr)

3.2.1.3 Sıkışık birim hacim ağırlık deneyi

Sıkışık birim hacim ağırlık deneyi TS 707 (1980)' ye göre şu şekilde yapılmıştır.

1. Sıkışık birim hacim ağırlık deneyinde ağırlığı tartılarak belirlenmiş uygun ölçü kabı üçte birine kadar doldurulur.

2. Bu işlem esnasında yüzeyin her tarafına yapılacak 25 vuruş ile sıkıştırma yapılır. Sıkıştırma işlemi, kap ikinci kez 2/3'ü üçüncü kez tamamı taşarcasına doldurularak oluşturulan ikinci ve üçüncü tabakalar içinde 25 kez şişlenerek tekrarlanır.
 3. Ölçü kabı üst yüzü şişleme çubuğu ile sıyrılarak düzeltilir.
 4. Daha sonra ölçü kabı agrega ile tartılır.
- Agreganın sıkışık birim ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\Delta = \frac{W_2 - W_1}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.9)$$

Burada;

Δ : Sıkışık birim hacim ağırlık (kg/m³)

W₂ : Şıkışık agrega ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W₁ : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (dm³)

3.2.1.4. Gevşek birim hacim ağırlık deneyi

Gevşek birim hacim ağırlık deneyi TS 707(1980)'ye göre şu şekilde yapılmıştır.

1. Gevşek birim hacim ağırlık deneyinde ağırlığı tartılarak belirlenmiş uygun ölçü kabı üçte birine kadar doldurulur.
2. Ölçü küreğinin ölçü kabı üst yüzeyinden 5 cm'den fazla yükseğe kaldırılmamasına özen gösterilerek taşarcasına doldurulur.
3. Ölçü kabı içindeki agrega ile birlikte tartılır.

Agreganın gevşek birim hacim ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\Delta = \frac{W_2 - W_1}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.10)$$

Burada;

Δ : Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m³)

W₂ : Gevşek agrega ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W₁ : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (dm³)

3.2.2. İnce madde oranının yıkama ile tayini

Bu deney tane büyüklüğü 4 mm den büyük olan agregalara (iri agregalara) uygulanır. Deney numunesi etüv kurusu durumuna getirilir, tartılarak kuru ağırlığı (W1) saptanır. Yeterli miktarda su ile birlikte çalkalama kabına konur. En az 12 saat su içinde bekletildikten sonra 0.063 mm'den ince tanelerin daha irilerden ayrılmalarını sağlamak üzere 5 dakika süre ile kuvvetlice karıştırılarak çalkalanır. 8 mm, 1 mm ve 0.033 mm göz açıklıklı elekler sıra ile dizilir ve çalkalanmış olan deney numunesi suyu ile birlikte en üstteki eleğin içerisine boşaltılır. Çalkalama anında ince malzeme kalmaması için kap yıkama suyu berrak hale gelinceye kadar yıkanır ve yıkama suyu eleklerden geçirilir (Uzun, 2011). Eleklerin her üçünün üzerinde kalan agregalar bir araya toplanır, etüv kurusu durumuna getirilir, tartılır. (W2), (ASTM C 117-90, 1993). Yıkatabilen ince madde, 0.063 mm göz açıklıklı kare gözlü elekten geçen madde etüv kurusu ağırlığının, agreganın etüv kurusu ağırlığına oranı olarak aşağıdaki gibi formülle hesaplanır:

$$m = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.11)$$

m : Yıkatabilen ince madde oranı (%)

W1 : Numunenin deney öncesi etüv kurusu ağırlığı

W2 : Numunenin deney sonrası etüv kurusu ağırlığı

3.2.3. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agrega gradasyonunun belirlenmesi

Agrega kırılmış çakıl veya taş, kum ve mineral fillerden oluşur. Yolun yapıldığı yörede bulunan malzemedan faydalanmak uygun bir çözümdür. Kaplama tabakası kendine gelen yükleri sabit bir deformasyona uğramadan temel

tabakasına geçirecek kadar kararlı olmalıdır. Bu da agreganın granülometrik bileşimine, danelerin şekline ve direncine bağlıdır (Umar ve Ağar, 1991).

3.2.4. Los Angeles aşınma dayanımını tespiti

Los Angeles deneyi aşınma ve darbelenme etkileri sonucunda mineral agregaların standart gradasyonunun bozulmasının ölçümü deneyidir. Bu deneyde, 14 mm deney eleğinden geçen 10 mm deney eleğinde kalan agregalara uygulanır. Deney kısmının kütlesi (5000±5) gr'dır. Deney için 31 devir/dk ile 33 devir/dk arasında dönme yapabilen, 11 adet çelik bilye ile aşındırma yapabilen bir tambur kullanılır.

Los Angeles Deneyi ASTM C 131 (1991)'e göre şu şekilde yapılmıştır.

1. Tamburun içinin temizliği kontrol edildikten sonra, önce bilyeler daha sonra agrega numunesi tambur içine yerleştirilir ve tamburun kapağı sıkıca kapatılır.
2. 500 devir dönme işlemi tamamlandıktan sonra, tamburun açıklık kısmı tepsinin tam ortasına getirilerek agregalar tepsiye dökülür.
3. Tambur temizlenir, ince tanelerin raf etrafında kalmamasına dikkat edilir.
4. Bilyeler tepside alandıktan sonra 1,6 mm'lik elek kullanılarak ıslak eleme yapılır.
5. 1.6 mm elekte kalan kısım 110±5 °C'deki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur.

Los Angeles Katsayısı LA aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$LA = \frac{5000-M}{50} \quad (3.12)$$

Burada;

M =1,6 mm'lik elek üzerinde kalan fraksiyon ağırlığıdır (gr).

Deney her bir numune için üçer adet yapılmış olup numuneler 500 devirlik aşınma işlemine tabi tutulmuştur. ASTM C 131-89'a göre yol kaplamalarında

kullanılacak malzemelerde aşınma %35 değerinden küçük olmalıdır (Uzun, 2011).

3.2.5.Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri

3.2.5.1.Penetrasyon deneyi

Yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının vizkozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda Penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon ölçmek için kullanılan alete 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 tetra klorür, tri klor etilen, 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 gibi. 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).

3.2.5.2. 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).

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A-(D-C))} \text{ (kN/cm}^3\text{)} \quad (3.13)$$

A= Piknometre ağırlığı (gr)

B= Su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)

C= Piknometre ve asfalt ağırlığı (gr)

D= Piknometre, asfalt ve su ağırlığı (gr)

3.2.6. 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) agregası 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.

3.2.7. Çalışmada kullanılan diğer bağıntılar

3.2.7.1. 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).

$$D_T = \frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3.14)$$

D_T = Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm³)

W_a = Agreg ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

G_{ef} = Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_b = Bitüm özgül ağırlığı (kN/cm³)

3.2.7.2. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi

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

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100+W_a} \times 100 \quad (3.15)$$

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_{sb} = Agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

W_a = Agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

3.2.7.3. Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu, kaplanmış agregada daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir (Önal ve Kahramangil, 1993).

$$V_h = \frac{(DT - DP)}{DT} \times 100 \quad (3.16)$$

$$V_f = \frac{(VMA - V_h)}{VMA} \times 100 \quad (3.17)$$

V_h = Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki agregada boşluğu (%)

V_f = Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)

D_T = Kaplama karışımının max. özgül ağırlığı (kN/cm^3)

D_P = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)

3.2.8. 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 Açar, 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 s.'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 agrega boşluğu yüzdesi saptanır (Umar ve Açar, 1991). Marshall Stabilite test aleti Şekil 3.1.'de verilmiştir. Marshall Stabilite test tokmağı Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Marshall stabilite deney aleti



Şekil 3.2. Marshall stabilite deney tokmağı

3.2.9. 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 (2-4) arasında olup olmadığı kontrol edilir. Bu şekilde saptanan bağlayıcı oranına göre gerçekleştirilen bir beton asfalt karışımı şartnamelerde aranan özellikleri taşıyacaktır (Umar ve Ağar, 1991).

3.2.10. Dolaylı çekme deneyi

Nemin etkilerini ölçmek için ya da bir asfalt karışımının kırılma direncini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir. Gerilme mukavemeti genellikle AASHTO TP9-02 (2002) ile uygun olarak gerçekleştirilen bir dolaylı çekme mukavemeti testi ile tam olarak belirlenebilir.

Yüklemeye yapılandırması uygulanan yükün yönüne dik ve dikey çap boyunca bölerek örneğin başarısız olmasına neden olan dikey çapsal düzlem boyunca nispeten homojen bir çekme gerilmesi geliştirir. Testin tutarlı bir şekilde gerçekleşmesini garantilemek için İndirekt Çekme Mukavemeti (Indirect Tensile Strength - ITS) mukavemeti testinin bir test prosedürü hazırlanmıştır. (Tran ve Van Loon, 2008).

Bu testten önce, kalıplar prosedüre göre ölçülmüş ve 45 °C derecede 30-40 dakika bekletilmek üzere su banyosuna konulur. Test sıcaklığı yüksek sıcaklık aralığında asfalt mukavemetini ifade etmesi için 45 °C derece olarak belirlenir, ancak ziftin yumuşama sıcaklığının altındadır. Numuneler 50 mm/dk levhanın hareket oranını vermek için esneklik modülü tarzı bir yüklemeye jiginin içine yerleştirilir. Bu yüklemeye jigi yükün sabit hızda başlaması için MS makinesine yerleştirilmiştir (Tran ve Van Loon, 2008).

Dolaylı çekme mukavemetini belirlemek için dolaylı çekme dayanım testi prosedüründeki hesaplamalar yapılır.

3.2.11. Koşullandırılmış dolaylı çekme mukavemeti ve elastisite modülü

İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) testi, Marshall cihazı kullanılarak dakikada 51mm'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).

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t x d} \quad (3.18)$$

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

t : Numunenin kalınlığı (mm),

d : Numunenin çapı (mm).

Elastisite modülü malzemenin dayanımının ölçüdür. Birim uzama ile normal gerilme arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucu olup birim uzama başına gerilme olarak tanımlanır. Elastisite modülünü hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$E(\text{MPa}) = E (\text{MPa}) = (2.2 * S_t) + 168 \quad (3.19)$$

Bunun için öncelikle elde edilen karışımdan altı adet Marshall numunesi hazırlanır. Bu numuneler öncelikle sabit ağırlığa ulaşınca kadar 72 saat boyunca 40° C sıcaklıkta bekletilir. 72 saat sonunda her altı numune de etüvden çıkartılır ve üçü 25° C sıcaklıkta su banyosuna 24 saat boyunca beklemek üzere yerleştirilir. Diğer üç numune ITS_{KURU} değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılır. Su banyosunda bekleyen numuneler 24 saat dolunca banyodan çıkartılır ve ITS_{ISLAK} 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 \emptyset 100mm Marshall numuneleri hazırlanır ve ITS_{KURU} ve ITS_{ISLAK} değerleri elde edilir. Aktif filler kullanılmayan numune ve kullanılan her bir aktif filler ile hazırlanan numunelerin Çekme Mukavemeti Oranı (Tensile Strength Ratio – TSR) değerleri 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.

$$TSR = \frac{ITS_{ISLAK}}{ITS_{KURU}} * 100 \quad (3.20)$$

Burada ITS_{ISLAK} ve ITS_{KURU} değerleri ıslak ve kuru ITS değerlerinin ortalaması olup TSR değeri ortalama ıslak ve kuru değerlerinin oranının % olarak hesaplanmasıdır (ASTM D6931, 2012). Dolaylı çekme deney aleti Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Dolaylı çekme deney aleti

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Mineral Agreganın Fiziksel Özellikleri

Isparta civarındaki Gümüşgün taş ocağından alınan kırmataş mineral agreganın özgül ağırlık tayini için yapılan deneyler ve sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Asfalt karışım örnekleri için agrega tane dağılımı eğrileri KGM Teknik Şartnamesine uyularak seçilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Çalışmada agrega olarak kullanılan iri ve ince kireçtaşı malzemesinin özellikleri

Elek çapı	Özellikleri	Standart	Kireçtaşı Agregası
4.75- 0.075mm	Özgül Ağırlık (gr / cm ³)	ASTM C 127-88	2.660
	Doymuş Özgül Ağırlık		2.652
	Su Emme (%)		0.130
25- 4.75mm	Özgül Ağırlık (gr / cm ³)	ASTM C 128-88	2.329
	Doymuş Özgül Ağırlık		2.428
	Su Emme (%)		2.800

4.1.1. Gevşek sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları

Gevşek sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.2'de görülmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi iri kireçtaşı numuneleri ince kireçtaşı numunelerinden yüksek değerlere sahiptir

Çizelge 4.2. Çalışmada agrega olarak kullanılan ince ve iri kireçtaşı malzemesinin birim hacim ağırlık değerleri

Elek çapı	Özellikleri	Standart	Kireçtaşı Agrega
4.75- 0.075mm	Gevşek birim hacim ağırlık	TS 707 (1980)	1.81
	Sıkışık birim hacim ağırlık	TS 707 (1980)	2.25
25- 4.75mm	Gevşek birim hacim ağırlık	TS 707 (1980)	1.51
	Sıkışık birim hacim ağırlık	TS 707 (1980)	1.70

4.2. Los Angeles Aşınma Dayanımının Tespiti

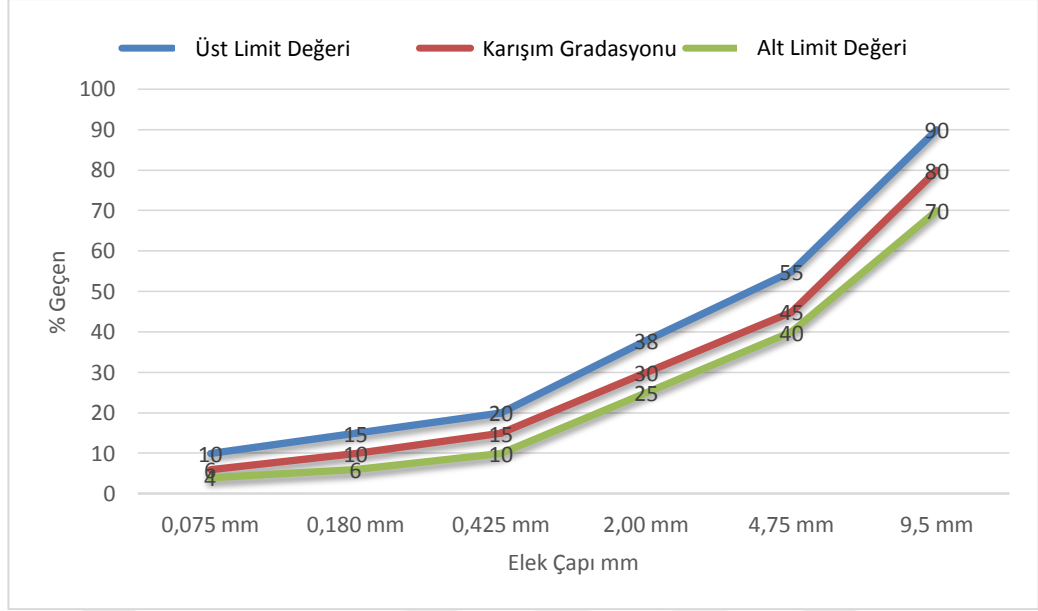
Kireçtaşı malzemelerinin Los Angeles Deneyi ASTM C 131'e göre aşınma değerleri Çizelge 4.3' te verilmiştir. ASTM C131-89'a göre yol kaplamalarında kullanılacak malzemelerde aşınma %35 değerinden küçük olmalıdır.

Çizelge 4.3. Kireçtaşı Los Angeles deneyi sonuçları

Özellik	Standart	Kireçtaşı Agrega
Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C 131	20.38

4.3. Numunelerde Kullanılacak Agrega Gradasyonu

Deneyde kullanılan agreganın elek analizi ASTM C136-84a, (1992)'ye göre yapılmıştır. Mevcut elek analizi sonuçları ve deneyler için seçilen agrega granülometrisi Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan agreganın gradasyon limitleri

Çizelge 4.4. Agreganın karışımı verileri

Agrega	Elek çapı	Yüzde	Ağırlık
1	12.5 mm	10	124.5 gr
2	9.5 mm	10	124.5 gr
3	4.75 mm	35	435.75 gr
4	2.00 mm	15	186.75 gr
5	0.425 mm	15	186.75 gr
6	0.180 mm	5	62.25 gr
7	0.075 mm	4	49.8 gr
8	Filler	6	74.7 gr
	TOPLAM	100	1245 gr

4.4. Kireçtaşı Optimum Bitüm Yüzdesi

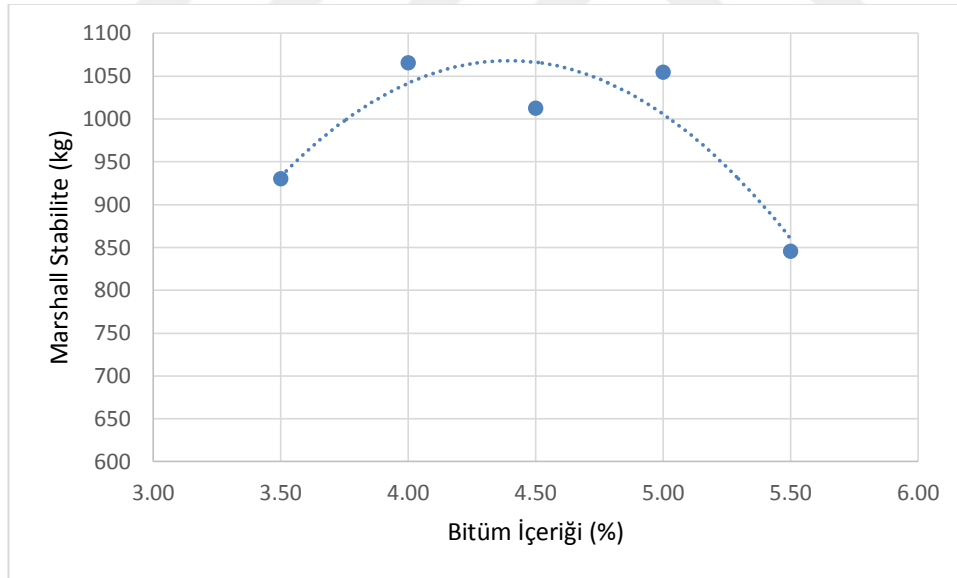
Optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi için Marshall deney metodu ve numuneleri hazırlanmış, agreganın gradasyonu sabit tutularak %3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 oranlarında bitüm oranı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına ilişkin grafikler Şekil

4.2, 4.3, 4.4, 4.5'de görülmektedir. Test sonuçlarından sonra bitüm özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Bitüm özellikleri

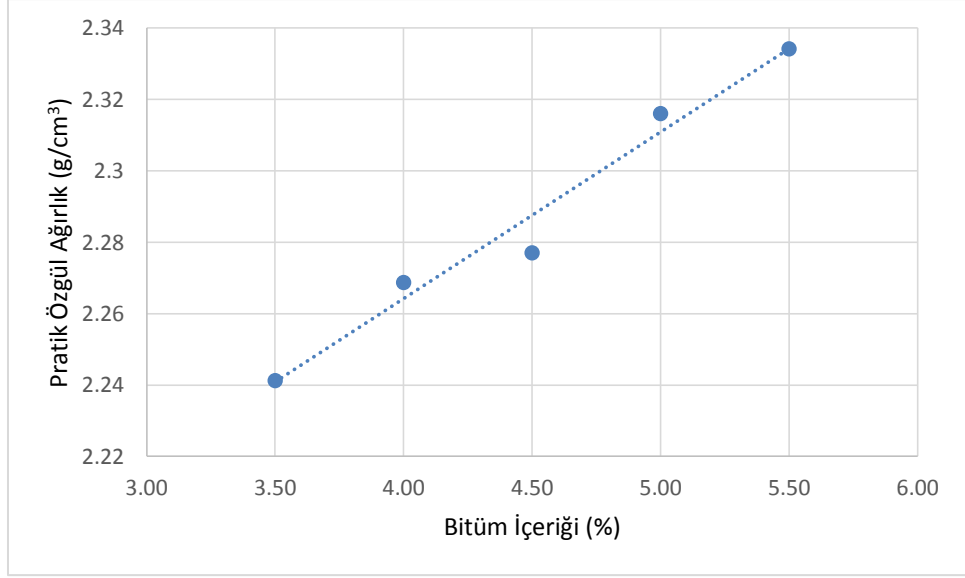
Test	Ortalama Değerler	Standart
Penetrasyon (25 °C)	60-70	ASTM D5
Alevlenme noktası	180°C	ASTM D92
Yanma Noktası	230 °C	ASTM D92
Yumuşama Noktası	45.5°C	ASTM D36
Süneklik (5 cm / dk)	>100 cm	ASTM D113
Özgül ağırlık	1.030	ASTM D70

Deney sonucunda maksimum stabilite değeri %4 bitüm oranı olarak hesaplanmıştır.



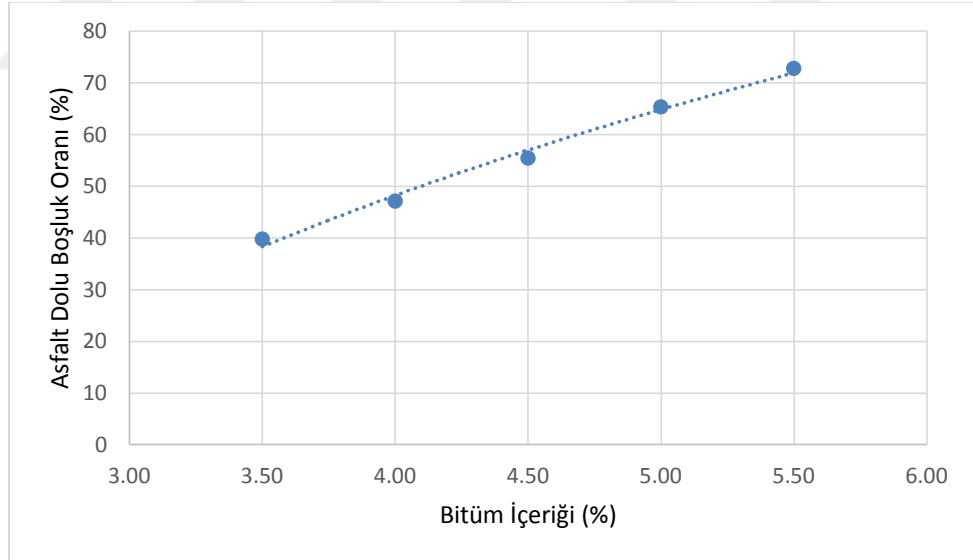
Şekil 4.2. Karışımın stabilite-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda grafikte kırılma görülmediğinden hesaplamalar sonucu maksimum birim ağırlık % 5.5 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.3).



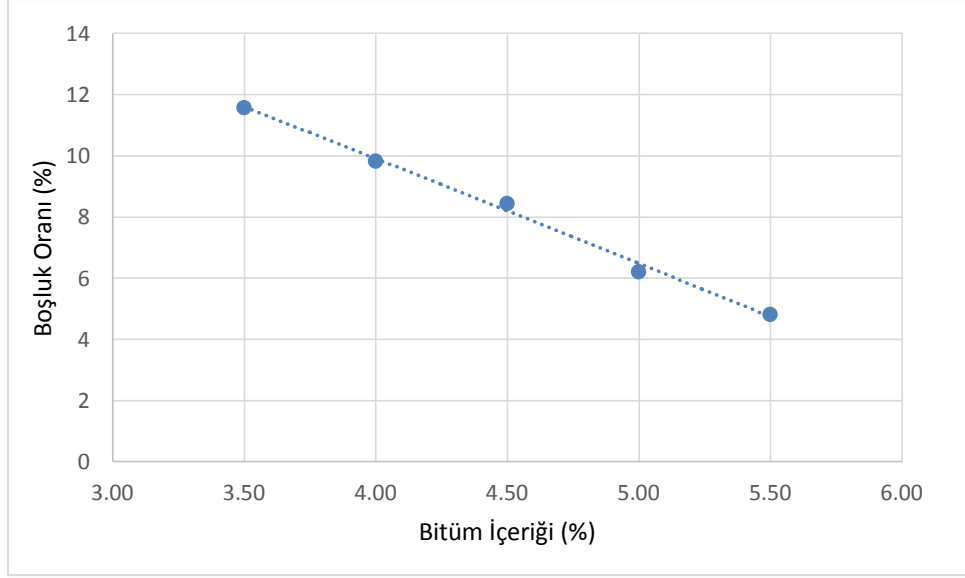
Şekil 4.3. Karışımın birim ağırlık-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi %80 olarak sağlayan bağlayıcı oranı % 5.5 olarak görülmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda şartnamede belirtilen %3-5 arasındaki sınır içinde kalan %5.5 boşluk oranına tekabül etmiştir.



Şekil 4.5. Karışımdaki boşluk hacmi-bitüm ilişkisi

Deney sonucunda hava boşluğu 5.5 olarak tayin edilmiştir.

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.

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

Denklem 4.1’den optimum bağlayıcı oranı 5.125 olarak bulunmuştur.

4.5. Karbon Fiberli Marshall Stabilite Deney Numunelerin Hazırlanması

4.5.1.Karışım tasarımı

Çalışmada kırılmış karbon fiber kullanılarak asfalt betonunun davranışını incelemek amaçlanmıştır. Deney örnekleri karbon fiberin asfalt karışımındaki

mekanik özelliklerini anlamak için 3 farklı konsantrasyonu (uzunluk) çalışılmıştır. 3 ayrı uzunlukta karbon fiber (3, 6 ve 12 mm) kullanılarak asfalt karışımları Marshall testi için hazırlanmıştır. Çalışmada en iyi sonucu elde edebilmek için 3 farklı karbon fiber uzunluğu için ayrı ayrı 6 farklı fiber oranı kullanılmıştır. Her uygulanan oran için 3'er numune hazırlanmıştır. Fiber oranları agregaya ağırlığı yüzdesi(1245gr) baz alınarak hesaplanmıştır. Karbon fiber oranları %0.25, %0.50, %0.75, %1.00, %1.25, %1.50 olarak belirlenmiştir. Deney gruplarında aynı agregaya yüzdesi ve aynı bağlayıcı (% 5.125) yüzdesi kullanılmıştır. Karbon fiber içeren asfalt betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini incelemek için, deney grubu sonuçları istatistiksel olarak kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır.

Laboratuvarda agregalar TC. Karayolları Teknik Şartnamesindeki aşınma tabakası gradasyonuna göre seçilmiştir.

Çizelge 4.6. Karbon fiber çalışma matrisi

Deney Grubu (3-6-12 mm)		
Tekrar	Fiber Oranı %	Ağırlık
3	% 0.25	3.15 gr
3	% 0.50	6.25 gr
3	% 0.75	9.35 gr
3	% 1.00	12.45 gr
3	% 1.25	15.55 gr
3	% 1.50	18.65 gr

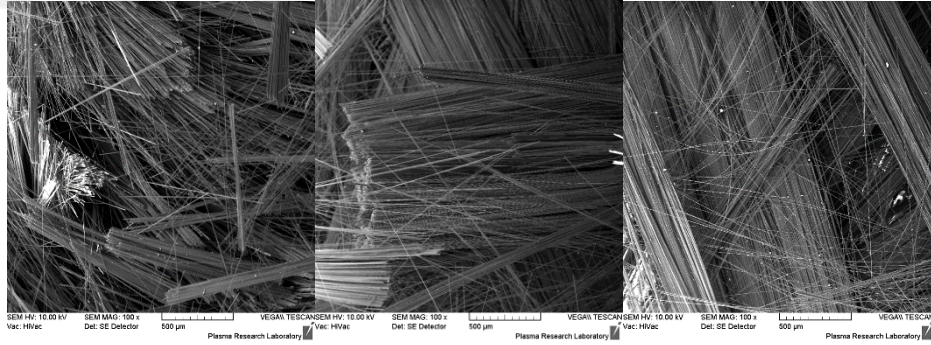
4.5.2. Karbon fiber ve asfalt binder karışımı

Başlangıçta karbon fiber, agregaya ve bitümü karıştırma tekniği için en basit yöntemlere başvurulmuştur. Karışım hazırlandığı esnada kaptaki bağlayıcının viskozitesini sabit tutabilmek için karıştırma kabı sürekli ısıtılmıştır. Asfalt betonunu hazırlarken kullanılan agregalarda bağlayıcının viskozitesini sabit tutabilmek için etüvde bekletilip kullanılmıştır. Bütün malzemeler el gücüyle kaşık yardımıyla karıştırılmıştır. Bu işlem sırasında karbon fiber sürekli kaşığa yapışmış ve bir spatula yardımıyla kazınarak tekrar karışımın içine ilave

edilmiştir. Karışım eşit bir kıvama gelinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 4.6. Karbon Fiber, Bitüm ve Agrega Harmanlanması



Şekil 4.7. Karbon Fiber SEM Görüntüleri, sırası ile 3mm, 6mm ve 12 mm

4.5.3. Marshall stabilitesi ve akma

Asfalt betonu karışımları kullanılan agreganın ağırlık cinsinden %5.125 oranında bitüm eklenerek hazırlanmıştır. Marshall dizayn sonuçları, her bir agregaya karışım formülasyonunun optimum bitüm içeriği sıkıştırılmış silindirik numunelerden elde edilmiş ve her karbon fiberli asfalt kaşımı grubundan 3

deney numunesinin ortalamasından elde edilen Marshall Stabilite değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4.8' de Marshall stabilite deney numuneleri görülmektedir.

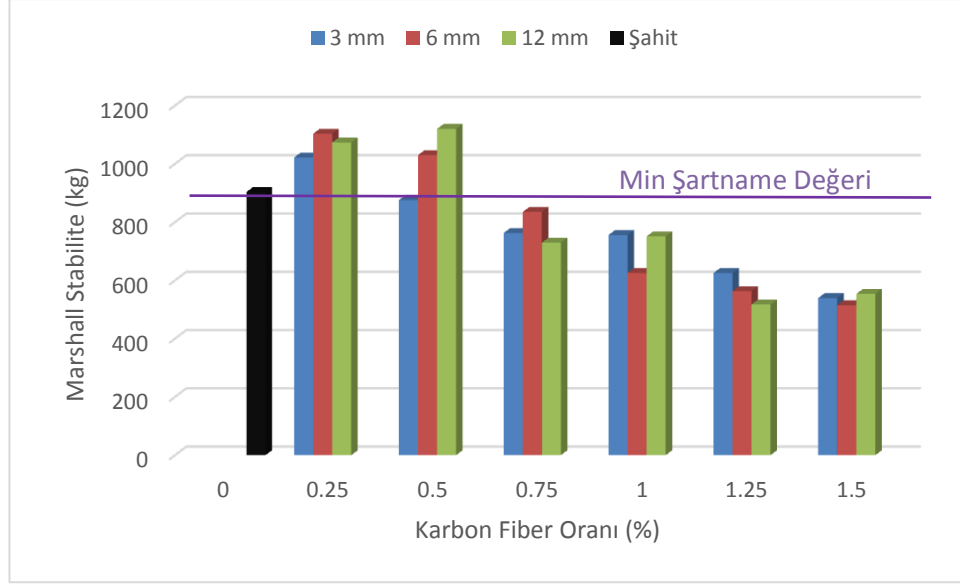


Şekil 4.8. Marshall Numuneleri

Çizelge 4.7. Marshall stabilite ve akma sonuçları

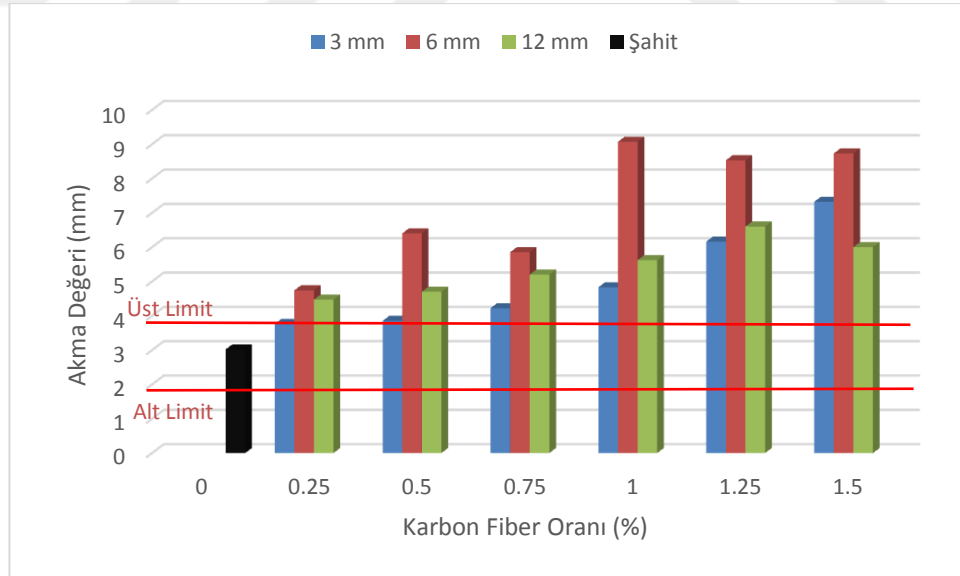
Fiber %	3mm karbon fiber		6 mm karbon fiber		12 mm karbon fiber	
	Marshall Stabilite	Akma	Marshall Stabilite	Akma	Marshall Stabilite	Akma
0	903.32	3.02	903,32	3,02	903.32	3.02
0.25	1021.67	3.76	1103.33	4.74	1073.33	4.47
0.5	875.67	3.85	1030.00	6.40	1120.00	4.70
0.75	762.67	4.22	835.00	5.85	729.33	5.20
1	755.67	4.83	625.33	9.07	751.00	5.62
1.25	625.00	6.16	562.67	8.53	517.33	6.60
1.5	539.33	7.32	514.67	8.73	553.67	6.00

Şekil 4.9'da uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin Marshall stabilite değerleri ve akma değerleri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi sadece 3, 6, ve 12 mm'lik %0.25 karbon fiber katkılı numuneler ve 6 ve 12 mm'lik % 0.50 karbon fiber katkılı numunler şartname gerekliliklerini karşılamaktadır.



Şekil 4.9. Marshall stabilite değerleri

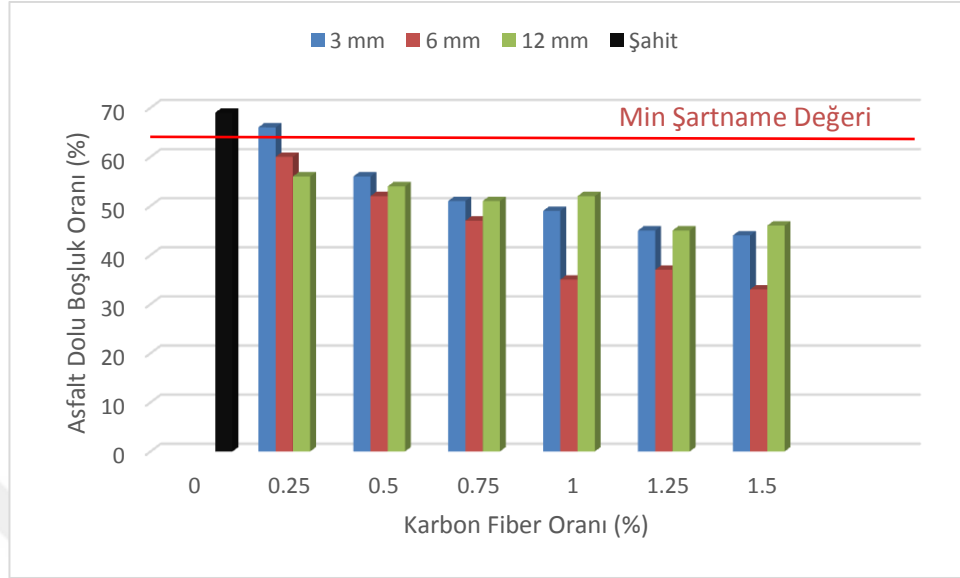
Şekil 4.10'da uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin akma değerleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sadece 0.25 ve 0.50 oranında 3 mm karbon fiberli numuneler şartnameye uygundur.



Şekil 4.10. Akma değerleri

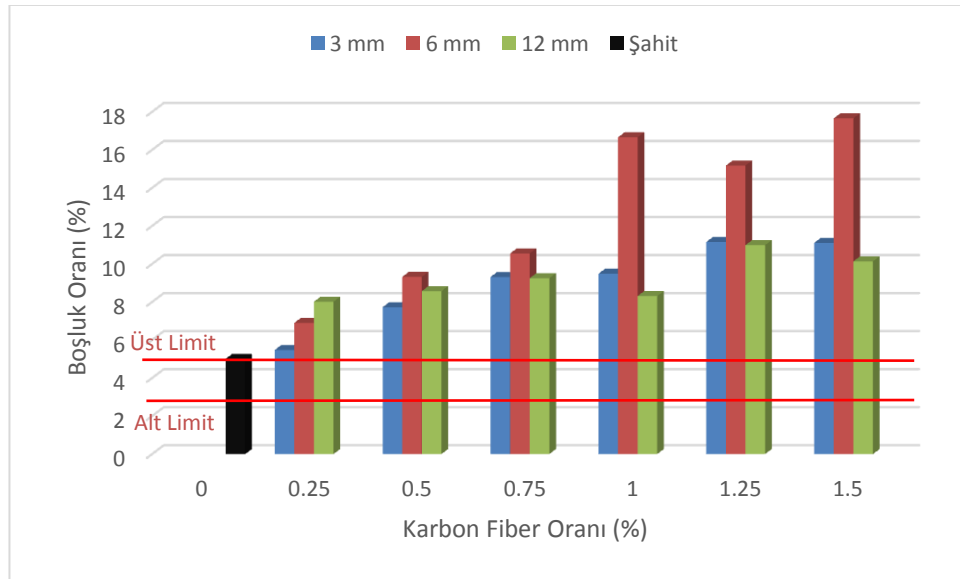
Şekil 4.11'de uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin asfalt dolu boşluk oranları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sadece 0.25 oranında 3 mm

uzunluğundaki karbon fiber katkıli numuneler şartname değerini sağlamaktadır.



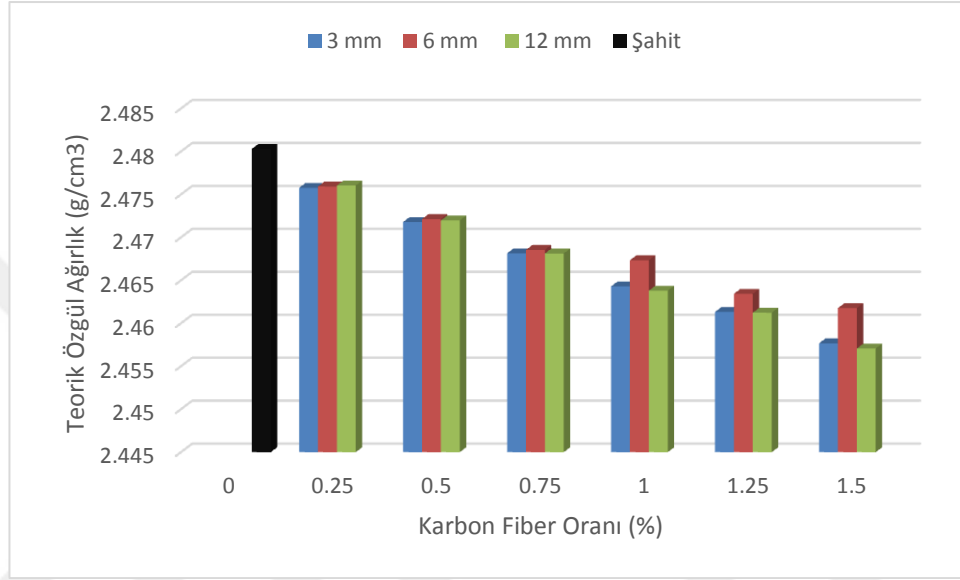
Şekil 4.11. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi değerleri

Şekil 4.12’de uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin boşluk oranları görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi karışıma eklenen karbon fiber oranı arttıkça boşluk oranı artma eğilimi göstermektedir. Yapılan testler sonucu hiçbir karbon fiber katkıli numune şartname değerlerini sağlamamaktadır.



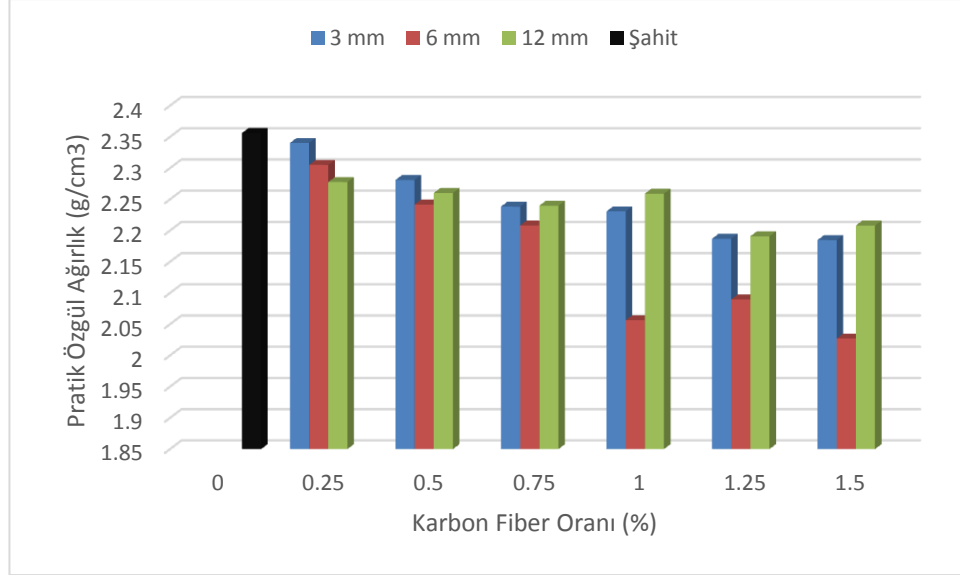
Şekil 4.12. Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki agrega boşluğu değerleri

Şekil 4.13’de uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin maksimum özgül ağırlık değerleri görülmektedir. En yüksek özgül ağırlık değeri şahit numunelerde elde edilirken karbon fiber katkısı arttıkça özgül ağırlık değerleri düşmektedir. Karbon fiber katkılı numuneler arasında en yüksek özgül ağırlığı 6 mm uzunluğundaki karbon fiber katkılı numuneler vermektedir.



Şekil 4.13. Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlık değerleri

Şekil 4.14’de uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin pratik özgül ağırlık değerleri görülmektedir. En yüksek özgül ağırlık değeri teorik özgül ağırlık değerlerinde olduğu gibi şahit numunelerde elde edilirken karbon fiber katkısı arttıkça pratik özgül ağırlık değerleri düşme eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.14. Sıkıştırılmış karışımın pratik özgül ağırlık değerleri

4.6. Dolaylı Çekme Deney Numunelerin Hazırlanması

4.6.1. Karışım tasarımı

Marshall Stabilite deneyinde olduğu gibi 3 ayrı uzunlukta karbon fiber (3, 6 ve 12 mm) kullanılarak numuneleri hazırlanmıştır. Her fiber grubu için kendi belirlediğimiz optimizasyona uyulmuştur. Çalışmada en iyi sonucu elde edebilmek için 3 farklı karbon fiber uzunluğu için ayrı ayrı 6 farklı fiber oranı kullanılmıştır. Her uygulanan oran için 3'er numune hazırlanmıştır. Fiber oranları agrega ağırlığı yüzdesi(1245gr) baz alınarak hesaplanmıştır. Marshall stabilite çalışmasında 0.25 ve 0.50 oranları en iyi sonuçları verdiği için, fiber katkı oranları %0.1, %0.2, %0.3, %0.4, %0.5, %0.6 olarak belirlenmiştir. Deney gruplarında aynı agrega yüzdesi ve aynı bağlayıcı(% 5.125) yüzdesi kullanılmıştır. Karbon fiber içeren asfalt betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini incelemek için, deney grubu sonuçları kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır.

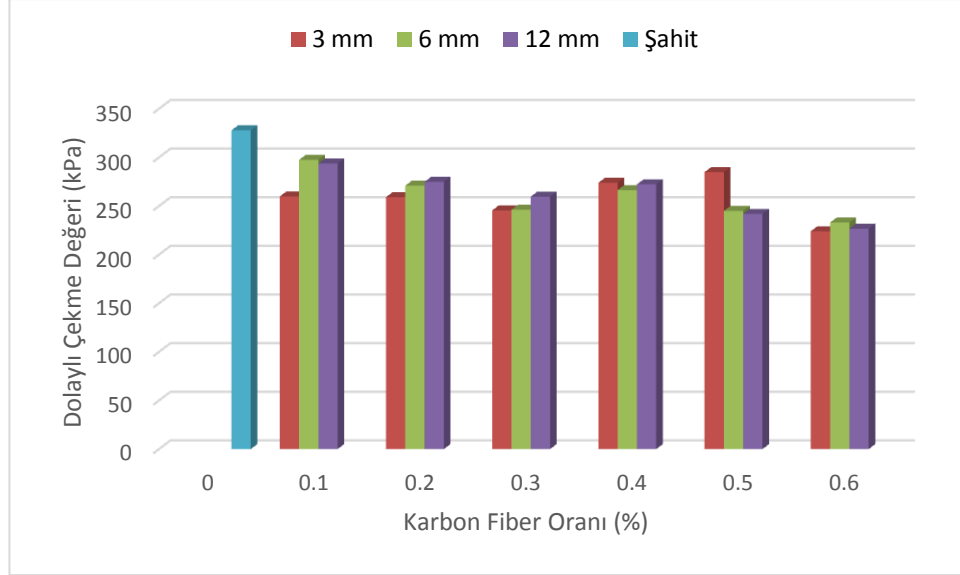
Çizelge 4.8. Dolaylı çekme için karbon fiber matrisi

Deney Grubu (3-6-12 mm)		
Tekrar	Fiber Oranı %	Ağırlık
3	% 0.1	1.25 gr
3	% 0.2	2.50 gr
3	% 0.3	3.75 gr
3	% 0.4	5.00 gr
3	% 0.5	6.25 gr
3	% 0.6	7.50 gr

Çizelge 4.9. Dolaylı çekme deney sonuçları

3 mm karbon fiber		6 mm karbon fiber		12 mm karbon fiber	
Fiber %	Gerilme Mukavemeti (St)	Fiber %	Gerilme Mukavemeti (St)	Fiber %	Gerilme Mukavemeti (St)
0	327.7886		327.7886		327.7886
0.1	259.7689	0.1	297.3725	0.1	293.6255
0.2	259.0429	0.2	270.8681	0.2	274.8396
0.3	245.4197	0.3	246.1647	0.3	259.6262
0.4	273.8487	0.4	266.3194	0.4	272.2911
0.5	284.8322	0.5	244.9271	0.5	241.8519
0.6	223.9889	0.6	232.9956	0.6	226.6893

Şekil 4.15’de uzunluklarına göre karbon fiberli numunelerin dolaylı çekme değerleri görülmektedir. En yüksek dolaylı çekme değeri şahit numunelerde elde edilmiştir. Karbon fiber katkılı numunelerin dolaylı çekme değerleri şahit numuneye göre daha düşükken, 3 mm uzunluğundaki fiber katkılı numuneler için maksimum dolaylı çekme değeri 0.5 oranında elde edilmiştir. 6 mm ve 12 mm için ise 0.1 oranı maksimum dolaylı çekme değerini vermektedir.



Şekil 4.15. Dolaylı Çekme Değerleri

4.7. Koşullandırılmış Dolaylı Çekme Deney Numunelerin Hazırlanması

Kırılmış karbon fiber kullanılarak asfalt betonunun dolaylı çekme davranışını değiştirmek amaçlanmıştır. Marshall stabilite deneyinde ve dolaylı çekme deneyinde en iyi sonucu 3 mm'lik karbon fiber vermiştir. Bunu göz önünde bulundurarak koşullandırılmış ve koşullandırılmamış dolaylı çekme deneyi için numuneler 3 mm karbon fiberle hazırlanmıştır. Bu çalışmada %0.4 ve %0.5 olarak iki karbon fiber oranı kullanılmıştır. Her orandan 4'er numune hazırlanmıştır. Fiber oranları agrega ağırlığı yüzdesi (1245gr) baz alınarak hesaplanmıştır.

Bunun için öncelikle elde edilen karışımdan dört adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler öncelikle sabit ağırlığa ulaşmaya kadar 72 saat boyunca 40 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. 72 saat sonunda her dört numune de etüvden çıkarılmıştır ve ikisi 25° C sıcaklıkta su banyosuna 24 saat boyunca beklemek üzere yerleştirilmiştir. Diğer iki numune ITS_{KURU} değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılmıştır. Su banyosunda bekleyen numuneler 24 saat dolunca banyodan çıkartılmıştır ve ITS_{KURU} değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılmıştır.

Çizelge 4.10. ITS_{KURU} ve ITS_{ISLAK} deney sonuçları

3 mm karbon fiber	0.4	0.5	Şahit
ITS_{KURU}	577.361	458.7881	533.5006
ITS_{ISLAK}	895.2111	681.2035	1031.352

TSR için Denklem 3.20 kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi tüm numuneler % 80 TSR oranının üzerindedir ve şartnameyi sağlamaktadır.

Çizelge 4.11. TSR deney sonuçları

3 mm karbon fiber	0.4	0.5	Şahit
TSR (%)	155.052	148.479	193.318

4.8. Elastisite Modülü

Elastisite modülünü için denklem 3.19 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Çizelge 4.12. Elastisite modülü deney sonuçları

3 mm karbon fiber	0.4	0.5	Şahit
E_{KURU}	1398.20	1177.33	1341.70
E_{ISLAK}	2137.46	1666.65	2436.97

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, karbon fiberin asfalt karışımındaki davranışı araştırılmıştır. Bu çalışma karbon fiber kullanılarak standart bir asfalt beton karışımının davranışındaki değişikliği belirlemek için bir ön çalışma niteliğindedir. Karbon fiberli asfalt karışımın mekanik özelliklerinde gelişmeler elde etmek için Marshall stabilite, akma ve indirekt çekme değerlerine odaklanılmıştır.

Öncelikle karışımda kullanılacak aynı granülometri eğrisine sahip kireçtaşı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde Marshall stabilitesi için kullanılan optimum bitüm yüzdeleri (%5.125) kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında; fiber oranları agrega ağırlığı yüzdesi(1245gr) baz alınarak hazırlanmıştır. Fiber oranları %0.25, %0.50, %0.75, %1.00, %1.25, %1.50 olarak kullanılmıştır. Marshall stabilite sonuçlarına göre % 0.25 ve 0.50 fiber oranında 3 ve 6 mm uzunluğundaki karbon fiber katkıli numuneler en iyi sonuçları vermiştir.

Daha sonra en iyi stabilite sonucunu veren %0.5 karbon fiberli karışımın bitüm oranını %5.5 olacak şekilde hazırlanan numunelere Marshall Stabilite deneyi yapılmıştır. Karbon fiber uzunluğu asfalt betonun davranışını değiştirebileceği düşünülmüştür. En iyi Marshall stabilite değeri 0.25 oranında 6 mm uzunluğundaki karbon fiber katkıli numunelerde belirlenmiştir.

Dolaylı çekme deneyi için başlangıçta yapılmış olan Marshall stabilite deney sonuçlarında en yüksek stabilite değerini veren aralık dikkate alınarak % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 fiber oranları kullanılmıştır. En yüksek dolaylı çekme değeri 0.1 oranında 6 mm uzunluğunda karbon fiber katkıli numunelerde elde edilmiştir.

Bir numune için kullanılan karbon fiber oranı % 0.25 olduğunda 1 kg asfalt karışıma katılan fiberin maliyeti 30 kuruştur. Karbon fiberlerin maliyeti de dikkate alındığında, asfalt betonu karışımların performansında dikkate değer bir artış gözlenemediğinden kullanılması uygun görünmemektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda hem bitüm içinde karbon fiberin etkisini görmek için süperpave deneylerinden Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Eğilme Kiriş Reometresi(BBR) ve Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) yapılarak sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Ayrıca karbon fiberlerin uzun süredeki üstyapı davranışına etkisi araştırılmalıdır. Farklı agrega ve bitüm oranlarıyla da araştırma yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- AASHTO TP9-02, 2002, Standard Test Method for Determining Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device (Draft Test Protocol), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Abtahi, S., M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S., M., 2009, Fiber-reinforced asphalt-concrete, Construction and Building Materials, pp 871-877.
- Ahmetzade, P., Alataş, T., Geçkil T., 2008, Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 2008 4493-4507, Yazı 297.
- Ahmetzade, P., Alataş, T., Geçkil T., 2008, Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 2008 4493-4507, Yazı 297.
- ASTM C 117-90, 1993, Standard Test Method for Materials Finer than 75-mm (no.200) Sievein Mineral Aggregates by Washing, Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.02,s.57-59.
- 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 128-88, 1992, Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards USA.
- 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 C 131-96, 1996, Standard test method for resistance to abrasion of Small-size coarse aggregate by use of the Los Angeles machine, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 136-84a, 1992, Standard Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of 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, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- 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.
- Chen, H., Xu Qinwu, Chen S and Zhang Z, 2009, "Evaluation and design of fiber reinforced asphalt mixtures," Material and Design, ISSN. 0261-3069.
- Cleven, M., A., 2000, Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures. PhD Thesis. Michigan Technological University.
- Dost Kimya, 2015. Erişim Tarihi: 2.8.2015. <http://www.dostkimya.com/tr/urun-gozat/karbon-elyaf-kirpilmis-/25>.
- Geçkil, T., Alataş, T., Ahmedzade, P., 2011, Siyah Karbonun Bitümün Tekerlek İzi Dayanımı Üzerindeki Etkisi. 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Fitzgerald, R., L., 2000, Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Pre-forms, Master Thesis of Science in Chemical Engineering Michigan Technological University.
- Fu, S.-Y., Lauke, B., Mañder, E., Yue, C.-Y., Hu, X., 2000, Tensile Properties of Short-glass-fiber and Short-carbon-fiber Reinforced Polypropylene Composites.
- Jahromi, S., G., Khodaii, A., 2008, Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete. The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 33, Number 2B, pp 355-364.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2015. Devlet ve İl Yolları Envanteri. Erişim Tarihi:5.8.2015. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatislikler/DevletIlYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf>.

- 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, pp 465-468, Hanoi, Vietnam.
- Önal, M., A., Kahramangil, M., 1993, "Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı", T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Serin, S., Morova, N., Saltan, M., Terzi, S., 2012, Investigation of Usability of Steel Fibers in Asphalt Concrete Mixtures, Construction and Building Materials, pp 238-244.
- Serfass, JP., Samanos, J., 1996, Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior. AAPT, 65, pp 193-230.
- Shanbara, H., K., 2014, Effect Of Carbon Fiber On The Performance Of Reinforced Asphalt Concrete Mixture, Department of Civil Engineering, Al-Muthanna University.
- Tapkın, S., 2007, Polipropilen Fiberlerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı, Bildiriler Kitabı, 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül, 216-226, İstanbul, 2007, 21/09/2007.
- Tran, J., Van L., H., 2009, Indirect Tensile Strength of Asphalt Mixes in South Australia, Australian Asphalt Paving Association, Thirteenth International Flexible Pavements Conference, Surfers Paradise, Queensland, Australia, pp. 1-3.
- TS 707,1980, Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Umar, F., Açar, E., 1991, Yol Üst Yapısı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 339s.
- Uzun, İ., 2011, Andezitin Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta
- Zube, E., 1956, Wire mesh reinforcement in bituminous resurfacing. Highway Research Record, Bulletin, No. HS-023 499.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özge DEMİRKAYA
Doğum Yeri ve Yılı : Gönen/Balıkesir, 1989
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozgedemirkaya89@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Afyon Cumhuriyet Lisesi, 2007
Lisans : AKÜ, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Öğretmenliği, 2012