



**DEĞİŞİK TİPTEKİ AGREGA VE BAĞLAYICININ
SICAK KARIŞIM ASFALTIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Merva GÖRGÜLÜ

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği Teknolojileri
Programı: Ulaştırma**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Remzi NAMLI

TEMMUZ-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK TİPTEKİ AGREGA VE BAĞLAYICININ SICAK
KARIŞIM ASFALTIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Merva GÖRGÜLÜ

(141139111)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği Teknolojileri

Programı : Ulaştırma

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Remzi NAMLI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Temmuz 2018

TEMMUZ-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK TİPTEKİ AGREGA VE BAĞLAYICININ SICAK
KARIŞIM ASFALTIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Merva GÖRGÜLÜ
(141139111)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Temmuz 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Temmuz 2018

Tez Danışmanı :	Dr. Öğr. Üyesi Remzi NAMLI	(F.Ü)	
Diğer Jüri Üyeleri :	Dr. Öğr. Üyesi M. Ethem KIZIRGİL	(F.Ü)	
	Dr. Öğr. Üyesi Tacettin GEÇKİL	(İ.Ö)	

TEMMUZ-2018

ÖNSÖZ

Yüksek lisansa başladığımdan bugüne bana daima her konuda destek olan ve bu meslekte ilerlememi sağlayan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Remzi NAMLI'ya “Değişik Tipteki Agregâ ve Bağlayıcının Sıcak Karışım Asfaltın Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı yüksek lisans tez çalışmamda gösterdiği ilgi ve desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Fikirleri ile beni destekleyen Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü hocalarıma özellikle Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a yardımlarını benden esirgemedikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimde malzemelerimin teminini sağlamamda bana yardımcı olan Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği ulaşım laboratuvarı tüm çalışanlarına ve değerli şefleri Hacı Bayram TAŞKIRAN'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her konuda beni destekleyen, annem, babam ve kardeşlerime bana gösterdikleri sabır, sevgi ve destekten dolayı teşekkür ederim.

**Merva GÖRGÜLÜ
ELAZIĞ**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Karayolu Üstyapıları.....	3
1.1.1. Rijit Üstyapılar.....	3
1.1.1.1. Taban Zemini.....	4
1.1.1.2. Temel ve Alt Temel Tabakası.....	5
1.1.1.3. Beton Kaplama	5
1.1.2. Esnek Üstyapılar.....	5
1.1.2.1. Taban Zemini.....	7
1.1.2.2. Alt Temel Tabakası.....	7
1.1.2.3. Temel Tabakası.....	8
1.1.2.4. Kaplama Tabakası	8
1.1.2.4.1. Binder Tabakası	8
1.1.2.4.2. Aşınma Tabakası	9
1.1.3. Kompozit Üstyapı.....	9
1.2. Esnek Üstyapıda Kaplama Tabakasında Kullanılan Bitümlü Karışımlar Ve Özellikleri.....	9
1.2.1. Bitümlü Karışımlar	9
1.2.2. Bitümlü Karışımların Sınıflandırılması	10
1.2.2.1. Bitümlü Soğuk Karışımlar	10
1.2.2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar	10
1.2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	12
1.2.3.1. Agregaların Mineralojik Olarak Sınıflandırılması.....	13
1.2.3.2. Agregalarda Gradasyon	13
1.2.3.3. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı	14

1.2.3.4.	Agregalarda Porozite	15
1.2.3.5.	Agregalarda Yüzey Alanı ve Boşluk	15
1.2.3.6.	Agregalarda Özgül Ağırlık	15
1.2.3.7.	Agregaların Fiziksel Özellikleri	16
1.2.4.	Bitümlü Bağlayıcılar.....	18
1.2.4.1.	Kaplama Sınıfı Bitümler.....	20
1.2.4.2.	Bitümün Kimyasal Bileşenleri.....	20
1.2.4.2.1.	Bitümün Özgül Ağırlığı.....	22
1.2.4.2.2.	Bitümün Hacimsel Genişlemesi	22
1.2.4.2.3.	Bitümün Isıl Özellikleri ve Isıya Duyarlılığı	22
1.2.4.2.4.	Bitümün Reolojik Özellikleri	22
1.2.5.	Bitümlü Karışımlarda Aranılan Fiziksel ve Mekanik Özellikler.....	23
1.2.5.1.	Stabilite	24
1.2.5.2.	Durabilite (Dayanıklılık)	25
1.2.5.3.	Geçirimsizlik.....	25
1.2.5.4.	İşlenebilirlik.....	26
1.2.5.5.	Esneklik (Fleksibilite).....	26
1.2.5.6.	Yorulmaya Karşı Direnç.....	27
1.2.5.7.	Kaymaya Karşı Direnç	27
2.	MATERYAL VE METOT.....	28
2.1.	Çalışmada Kullanılan Agregalar	28
2.2.	Çalışmada Kullanılan Bitümler	28
2.3.	Çalışmada Kullanılan Aletler	28
2.4.	Metot.....	29
2.4.1.	Agregaların Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranları Tayini.....	31
2.4.1.1.	Kaba Agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini.....	32
2.4.1.2.	İnce Agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini	33
2.4.1.3.	Mineral Filler Özgül Ağırlık Tayini	34
2.4.2.	Bitüm Özgül Ağırlık Tayini	35
2.5.	Marshall Tasarım Yöntemi	36
2.5.1.	Agreganın Granülometrisinin Belirlenmesi.....	36
2.5.2.	Karışımda Agreganın Özgül Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	38
2.5.3.	Agrega ve Bitüm Miktarının Belirlenmesi	42

2.5.4.	Briketlerin Hazırlanması, İlgili Hesaplamalar ve Boşluk Analizleri.....	39
2.5.5.	Stabilite ve Akma Değerlerinin Belirlenmesi.....	45
2.5.6.	Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi	46
3.	BULGULAR ve TARTIŞMA	47
3.1.	Çalışmada Kullanılan Agregalara ve Bitümlere Uygulanan Deneylerin Sonuçları.....	47
3.2.	Karışımların Marshall Dizayn Sonuçları	51
3.3.	Marshall Deneyleri ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması ve İrdelenmesi	61
4.	SONUÇLAR.....	66
	KAYNAKLAR	69
	EKLER	73
	ÖZGEÇMİŞ	81

ÖZET

Bu çalışmada, değişik tipteki agregâ ve bağlayıcının sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmada kalker, bazalt ve dere malzemesi olarak 3 tip agregâ kullanılmıştır. Kalker Elazığ İli Kömürhan Taş Ocağı'ndan, bazalt Elazığ İli Harput Beton Taş Ocağı'ndan, Dere malzemesi ise Bingöl İli Genç-Murat Kum-Çakıl Ocağı'ndan temin edilmiştir. Bağlayıcı olarak Batman Rafinerisi'nden temin edilen 2 tip bitümlü bağlayıcı (B 50/70 ve B 160/220) kullanılmıştır. Kalker, bazalt, dere malzemesi ve kalker + dere malzemesi olan her agregâ grubu için % 4, % 4,5, % 5, % 5,5, % 6 oranlarında 2 tip bitümlü bağlayıcı kullanılarak asfalt karışımları hazırlanmıştır. Karışımların optimum bitüm oranları Marshall deneyleri yapılarak belirlenmiş ve bu deneyler sonucunda karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte karışımların stabilite, akma, yoğunluk ve boşluk değerleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan, bitüm ihtiyacının az olması, ekonomi ve stabilite bakımından diğer karışımlardan avantajlı olması, Marshall dizayn parametre değerlerinin sınır şartları sağlaması sebebiyle agregâ grubu kalker ve bitümlü bağlayıcısı B 160/220 olan karışımın daha iyi sonuçlar verdiği açıkça gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Agregâ, Bitümlü Bağlayıcı, Marshall Deneyi, Mekanik Özellikler

SUMMARY

The Effect of Different Aggregates and Binder Types on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

In this study, the effect of different aggregates and binder types on the mechanical properties of hot mix asphalt has been investigated experimentally.

Three types of aggregate were used as limestone, basalt and creek material in the study. Limestone from Elazığ city Kömürhan quarry, basalt from Elazığ city Harput concrete quarry and stream material from Bingöl city Genç-Murat sand gravel quarry were provided. Two types of bituminous binders supplied from Batman Refinery (B 50/70 and B 160/220) were used as binders. Asphalt mixtures were prepared using 2 types of bituminous binders in 4%, 4.5%, 5%, 5.5% and 6% ratios for each aggregate group of limestone, basalt, creek material and limestone + creek material. The optimum bitumen ratios of the mixtures were determined by Marshall experiments and the mechanical properties of the mixtures were evaluated. In addition, the stability, flow, density and void values of the mixtures are discussed comparatively.

From the results obtained from this study, It was clearly observed that the aggregate group limestone and bituminous binder B 160/220 mixture gave better results because Marshall design parameter values had boundary condition, low bitumen requirement, economical and stability advantages.

Keywords: Aggregate, Bituminous Binder, Marshall Test, Mechanical Properties.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kaplamalara göre yük dağılımı	4
Şekil 1.2.	Bitümlü kaplama kesiti.....	6
Şekil 1.3.	Esnek üstyapı katmanları	7
Şekil 1.4.	Bitümlü sıcak karışımın yapısı	11
Şekil 1.5.	Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı	14
Şekil 1.6.	Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri	16
Şekil 1.7.	Bitüm ile agrega arasındaki adezyon-kohezyon davranışı.....	19
Şekil 2.1.	Çalışmada kullanılan agrega gronülometrisi.....	38
Şekil 2.2.	Numune hazırlanmasında (a) Karıştırma işlemi (b) Otomatik tokmak yardımıyla sıkıştırılma işlemi	40
Şekil 2.3.	Numunelerin kalıplardan çıkarılmadan önce etiketlenmesi ve bekletilmesi	41
Şekil 2.4.	Numunelerin kalıptan numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılması	41
Şekil 2.5.	Briket yüksekliklerin belirlenmesi	42
Şekil 2.6.	Numunelerin (a) havadaki, (b) sudaki, (c) doymuş yüzey kuru haldeki ağırlıklarının belirlenmesi	42
Şekil 2.7.	Su banyosundan çıkarılan numunelerin Marshall stabilite aletinde kırılması.....	46
Şekil 3.1.	K 1 ve K 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilite - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği	49
Şekil 3.2.	B 1 ve B 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilite - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği	51
Şekil 3.3.	D 1 ve D 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilite - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği	53
Şekil 3.4.	KD 1 ve KD 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilite - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği	55
Şekil 3.5.	Karışımların optimum bitüm oranlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 3.6.	Optimum bitüm oranlarında karışımların pratik özgül ağırlıklarının karşılaştırılması	58

Şekil 3.7.	Optimum bitüm oranlarında karışımların stabilite değerlerinin karşılaştırılması	58
Şekil 3.8.	Optimum bitüm oranlarında karışımların boşluk oranlarının karşılaştırılması	59
Şekil 3.9.	Optimum bitüm oranlarında karışımların asfaltla dolu boşluk yüzdelерinin karşılaştırılması	59
Şekil 3.10.	Optimum bitüm oranlarında karışımların akma değerlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 3.11.	Optimum bitüm oranlarında karışımların agregalar arası boşluk yüzdelерinin karşılaştırılması	61
Şekil 3.12.	Karışımların pratik özgül ağırlıklarının karşılaştırılması	61
Şekil 3.13.	Karışımların stabilite değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 3.14.	Karışımların boşluk oranlarının karşılaştırılması	62
Şekil 3.15.	Karışımların asfaltla dolu boşluk oranlarının karşılaştırılması	62
Şekil 3.16.	Karışımların akma değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 3.17.	Karışımların agregalar arası boşluk oranlarının karşılaştırılması	63

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Düşük stabilite sebep ve etkileri.....	24
Tablo 1.2.	Düşük durabilite sebep ve etkileri.....	25
Tablo 1.3.	Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler.....	26
Tablo 1.4.	İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri	26
Tablo 1.5.	Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri	27
Tablo 1.6.	Düşük kayma direnci sebep ve etkileri	27
Tablo 2.1.	Deneysel çalışmalarda kullanılan aletler, özellikleri ve kullanım amaçları	29
Tablo 2.2.	Binder Tabakası gradasyon limitleri	30
Tablo 2.3.	Asfalt betonu dizayn kriterleri.....	30
Tablo 2.4.	Karışım tolerans sınırları	30
Tablo 2.5.	Marshall Tasarım Yönteminde kullanılan malzemelerin türü ve adlandırılması	31
Tablo 2.6.	Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları	37
Tablo 2.7.	Marshall stabilite faktörleri	43
Tablo 3.1.	Deneylerde kullanılan agregaların özgül ağırlıkları ve su emme yüzdeleri	47
Tablo 3.2.	Bitümlü bağlayıcıların özgül ağırlıkları	48
Tablo 3.3.	K 1 ve K 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri	50
Tablo 3.4.	K 1 ve K 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri	50
Tablo 3.5.	B 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri.....	52
Tablo 3.6.	B 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri	52
Tablo 3.7.	D 1 ve D 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri	54
Tablo 3.8.	D 1 ve D 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri	54
Tablo 3.9.	KD 1 ve KD 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri	56
Tablo 3.10.	KD 1 ve KD 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri	56

SEMBOLLER LİSTESİ

B 1	: Agrega türü bazalt, bitümlü bağlayıcı türü 50/70 penetrasyonlu bitüm olan karışım
B 2	: Agrega türü bazalt, bitümlü bağlayıcı türü 160/220 penetrasyonlu bitüm olan karışım
D 1	: Agrega türü dere malzemesi, bitümlü bağlayıcı türü 50/70 penetrasyonlu bitüm olan karışım
D 2	: Agrega türü dere malzemesi, bitümlü bağlayıcı türü 160/220 penetrasyonlu bitüm olan karışım
Dp	: Briketin hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Dport	: Briketlerin hacim özgül ağırlıklarının ortalamaları (gr/cm^3)
DT	: Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gb	: Bitümün özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gef	: Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gfa	: Filler malzemenin zahiri özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gia	: İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gib	: İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gka	: Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gkb	: Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gsa	: Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gsb	: Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)
Gse	: Agrega karışımının efektif özgül ağırlığı (gr/cm^3)
k	: Zemin yatak katsayısı
K 1	: Agrega türü kalker, bitümlü bağlayıcı türü 50/70 penetrasyonlu bitüm olan karışım
K 2	: Agrega türü kalker, bitümlü bağlayıcı türü 160/220 penetrasyonlu bitüm olan karışım
KD 1	: Agrega türü kalker + dere malzemesi, bitümlü bağlayıcı türü 50/70 penetrasyonlu bitüm olan karışım
KD 2	: Agrega türü kalker + dere malzemesi, bitümlü bağlayıcı türü 160/220 penetrasyonlu bitüm olan karışım
Vf	: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)
Vh	: Toplam hacim yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)
Wa	: Agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
Wb	: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)

c	: Kohezyon (kg/cm^2)
σ	: Kayma düzlemine dik normal basınç (kg/cm^2)
τ	: Kayma mukavemeti (kg/cm^2)
%F	: Filler malzemenin ağırlıkça yüzdesi
%İ	: İnce agregaların ağırlıkça yüzdesi
%K	: Kaba agregaların ağırlıkça yüzdesi
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı (derece)



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
ÇBGT	: Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel
GT	: Granüler Temel
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi (2013)
Maks	: Maksimum
Min	: Minimum
PMT	: Plent-Miks Temel
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
TS	: Türk Standartları

1. GİRİŞ

Canlıların, üretilen çeşitli ham ve işlenmiş maddelerin, postaların vb. bir yerden başka bir yere nakledilmesine ulaşım veya ulaştırma, nakil sırasında kullanılan sisteme de ulaştırma sistemi denilmektedir. Ulaşım sistemleri kara ulaştırma (karayolu ve demiryolu), denizyolu ve havayolu olarak sınıflandırılabilir. Pek çok ülkede en yaygın kullanılan ulaşım sistemi karayoludur. Ülkemizde yük taşımacılığının % 70'i, yolcu taşımacılığının da % 90'ı karayolu ile yapılmaktadır. Özellikle 1950'li yıllardan sonra, karayolu yapımı artmış ve ulaşım araçları çoğalmıştır. Bu nedenle karayolları mevcut durumda, birkaç yıl öncekinden hem trafik hacmi hem de dingil yükleri bakımından tahmin edilenin çok üzerinde bir zorlamaya maruz bulunmaktadır. Trafik hacmi ve dingil yüklerindeki bu aşırı artış, yol üst yapısını tahrip etmesi sebebiyle daha çok ve ağır araç taşıyabilen yeni yolların yapımını sürekli olarak zorunlu kılmaktadır. Yeni yapılacak yolların güvenlik, estetik, konfor gibi faktörlere uygun inşa edilmesi kaliteli yapı malzemesiyle mümkündür [1].

Ulaştırma sistemleri başta ekonomik olmak üzere sosyal siyasal ve kültürel gelişmeyi sağlaması yönünden en önemli altyapı yatırımı olarak görülmektedir. Ülkemizde son yıllarda yapılan ulaştırma yatırımları sayesinde hem toplam yol ağı uzunluğumuz hem de beton asfalt kaplamalı yol uzunluğumuz hızla artmaktadır. Ancak her gün artan ağır taşıt trafiği yollarımızı erken ve yapısal olarak tahrip edip bu yöndeki çabaların beton asfalt kaplamalı yol uzunluğunu artırmaktan çok, bakım onarım harcanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle mühendisler daha sağlam, uzun süre bakım onarım ihtiyacı göstermeyecek karışım tasarımları yapmak için çaba sarf etmektedirler [2].

Agrega ile bitümlü malzeme bileşiminden meydana gelen ve trafik yüklerine doğrudan maruz kalan kaplama tabakası, trafiğin aşındırma ve iklimin ayrıştırma etkilerine karşı direnç göstermek, yol yapısını sudan korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak konforlu bir sürüş sağlamak amacıyla, Sathi Kaplama veya Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Kaplama olarak inşa edilmektedir [3].

Bitümlü Sıcak Karışım (BSK)'lar, çok iyi servis performansı, sürüş konforu, stabilite, durabilite ve suya karşı dayanım sağlaması yönüyle yol üst yapılarında en çok kullanılan kaplama türüdür. BSK'ların mühendislik özelliklerini iyileştirmek için iki temel

yoldan birisi gradasyonu ve dolayısıyla asfalt çimentosu oranlarını değiştirmektedir. Diğer bir yol ise katkı maddeleriyle bitümlü sıcak karışım özelliklerini iyileştirmektedir [4].

Yol yapımında kullanılan agregalardan kalkerin bazik, bazaltın ise nötür olduğu kabul edilmektedir. Birçok çalışmada asfaltın asidik özellik sergilediği ve dolayısıyla bazik agregalarla daha iyi yapışma sağladığı, silisli agregalar ile asfalt arasındaki adezyonu artırmak için ise alkalin içerikli katkılar kullanıldığı belirtilmiştir [5].

BSK'ların yüksek kalitede imal edilmeleri gerektiği için stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma, işlenebilirlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin tümünü ideal olarak sağlayabilecek karışım tasarımlarının yapılması büyük önem arz etmektedir [6].

Geçmişten bugüne daha sağlam, ön görülen süre içerisinde trafik ve çevre şartlarının aşındırıcı etkilerine direnç gösterebilecek yolların inşası için büyük bir çaba sarf edilmekte, bu amaçla üstyapıyı oluşturan her bir tabakanın deneysel ve sayısal analizleri yapılarak stabilitesi ve durabilitesi yüksek karışımlar ve tabakalar elde edilmeye çalışılmaktadır [6].

Bitümlü sıcak karışımlarda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcı, agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar, BSK'larda ağırlıkça % 5-7 gibi düşük bir oranında kullanılmasına rağmen karışım performansı üzerinde çok büyük etkiye sahiptir [7].

Esnek kaplamaların ana malzemelerinden biri olan agregalar, yolun tasarımında büyük rol oynarlar. Farklı yol tabakalarında farklı agrega özellikleri aranır. Yollardaki aşınma tabakası (en üst tabaka) yol güvenliği açısından en önemli tabakadır. Yolun hizmet ömrünü güvenli bir şekilde tamamlaması için, kullanılan agregaların, sürtünme katsayılarının yüksek olması ve hizmet ömrü boyunca cilalanmaya karşı yüksek dayanım sağlaması istenir. Bunu sağlamak için asfalt karışımlarda kullanılan agregaların mekanik özellikleri oldukça iyi olmalıdır [8].

BSK'larda agrega olarak volkanik, tortul ve metamorfik gibi çok değişik kökenli agregaların yanı sıra demir-çelik üretiminde açığa çıkan atık malzemeler de kullanılabilir. BSK içerisinde yer alan malzemelerin, tipleri özellikleri miktarları ve hazırlanma şartları bu karışımın hizmet ömrü boyunca sahip olacağı performansı

belirlemektedir. Kullanılacak malzemelerin özellikleri, çevresel şartlar, kaplamanın sıkışabilirliğine ve dolayısıyla rijitliğine etki ederek üst yapının performansını belirlemektedir [9].

Bu çalışmada, değişik tipteki agrega ve bağlayıcının sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Tasarım yöntemi olarak da Marshall Tasarım Yöntemi kullanılmıştır.

1.1. Karayolu Üstyapıları

Karayolu; tüm kara taşıtları ve yaya ulaşımı için güvenlik parametresi de göz önünde bulundurularak belli standartlara göre yapılmış ve işaretlenmiş kamu hizmetine açık arazi şeridi, yol, otoyol, köprüler ve benzeri yapı alanlarıdır [10].

Karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır.

Karayolu altyapısı, yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak, yarma kesimlerinde tesviye yüzeyini oluşturmak amacıyla yapılan dolgu çalışmaları da karayolu altyapısına girer. Ayrıca; köprü, viyadük, tünel, menfez ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı olarak kabul edilir [11].

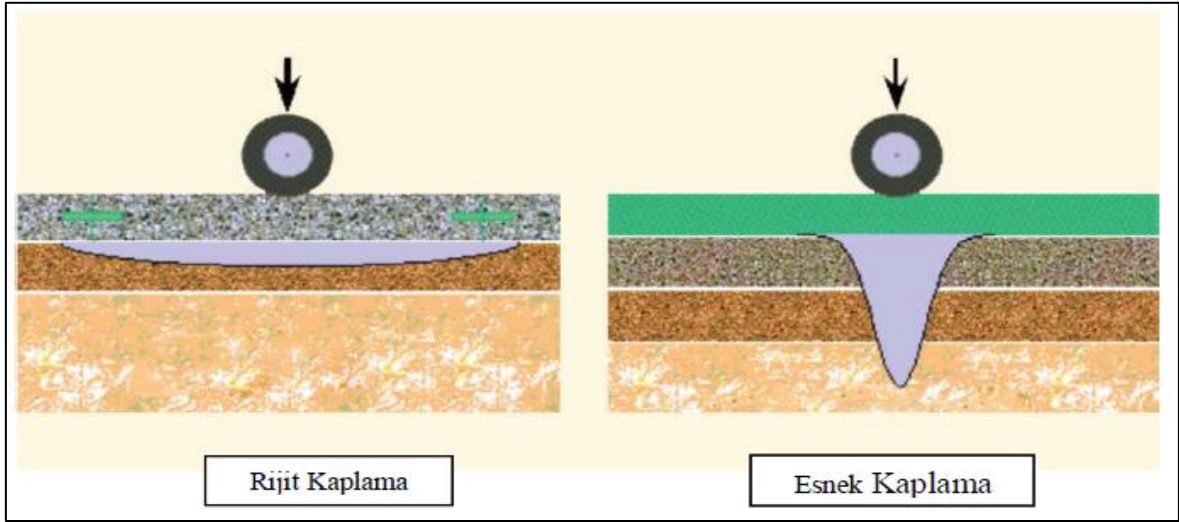
Karayolu üstyapısı, taşıtlardan kaynaklanan dingil yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen çoğunlukla alt temel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır [12].

Karayolu üstyapı inşaatında kaplama tabakası kullanılan malzemelerine ve yapım tekniklerine göre esnek üstyapı, rijit üstyapı ve kompozit üstyapı olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

1.1.1. Rijit Üstyapılar

Çimento betonu ile yapılan kaplamalarla oluşturulan üst yapıya “Rijit Üstyapı” ya da “Beton Yollar” denir. Beton yollar enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış 20 - 25 m² alana sahip plaklar halinde inşa edilebildiği gibi derzsiz olarak da inşa edilebilir. Beton plağın rijitliğinin yüksek olması nedeniyle taban zemininde oluşan gerilmeler geniş alana yayılır. Bu da kötü zeminlerde beton yolların kullanılabilirliğini artırır [13].

Beton, çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağıntı lineer değildir. Ayrıca, yükler kalktıktan sonra bir süre, betonda kalıcı deformasyonlar görülür. Daha sonra beton yavaş yavaş ilk durumuna döner [14]. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine iletilmesi Şekil 1.1’de görüldüğü gibi birbirinden farklıdır [15].



Şekil 1.1. Kaplamalara göre yük dağılımı [15].

Esnek üstyapılarda asfalt kaplama tabakasına gelen trafik yükü sırası ile temel ve alt temel tabakalarına yayılarak altyapıya, yani doğal zemine intikal etmektedir. Bu nedenle yükün taşınmasında her tabaka önemli olup tabaka kalınlıkları yüke ve zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Aynı koşullarda esnek üstyapı toplam tabaka kalınlığı rijit üstyapı tabaka kalınlığından daha fazla olması gerekmektedir. Rijit üstyapılarda ise beton kaplama tabakası (beton plak) betonun yüksek elastisite modülü ve rijitliği sayesinde yükü büyük ölçüde karşılamaktadır. Doğal zemine göreceli olarak çok daha küçük gerilme intikal ederek zemin özellikleri tabaka kalınlığının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaz. Temel tabakası beton plak için düzgün bir taban oluşturulması ve yeterli drenaj sağlanması amacı ile hazırlanmaktadır [15].

1.1.1.1. Taban Zemini

Taban zemini sıkıştırılmış doğal zeminden oluşmaktadır. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilmektedir. Bu tabakanın yolda oluşacak gerilmelere karşı koyması gerekmektedir. Eğer gerekiyorsa yapılacak olan karayolunun trafik yüküne, yol kalitesine ve iklim şartlarına bağlı olarak zemin ıslah

edilebilir. Bu zeminin esas görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyaç duyulmaktadır [16].

1.1.1.2. Temel ve Alt Temel Tabakası

Beton kaplama altında kullanılan alt temel tabakasının amacı beton plağa üniform stabil bir destek sağlamaktır. Tüm beton kaplamalar için minimum 10 cm alt temel tabakası gereklidir. Eğer ekonomik ise alt temel kalınlığını artırarak zemin yatak katsayısını ifade eden “k” değerinin yükseltilmesi ile beton kaplama kalınlığının azaltılması mümkün olabilir. Dere malzemesi, kırmataş agrega, bitümlü temel tabakası, çimento ile stabilize edilmiş temel (grobeton) ve çimento ile stabilize edilmiş zemin tabakaları alt temel tabakası olarak kullanılmaktadır [17].

1.1.1.3. Beton Kaplama

Beton kaplamalar, gelen trafik yüklerini karşılayan ve bunu temel tabakası ve taban zeminine yayarak ileten katman olup bu katmanın kalınlığı iklim şartlarına, trafik hacmine ve zemin durumuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Üç farklı çeşide ayrılabilirler;

- Derzli donatısız beton kaplama
- Derzli donatılı beton kaplama
- Derzsiz donatılı beton kaplama

Derzli donatısız beton kaplama en çok kullanılan beton yol kaplamasıdır. Derzli donatılı beton kaplamalarda donatı olarak çelik ağ kullanılmaktadır. Derzsiz donatılı beton kaplama sürekli olarak çelik donatısı olan genleşme derzleri bulunmayan kaplama türüdür.

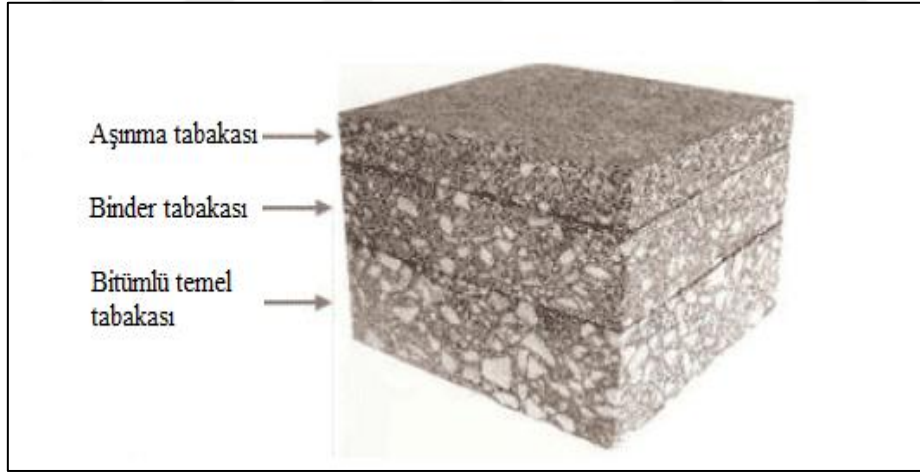
1.1.2. Esnek Üstyapılar

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapılara “Esnek Üstyapı” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alt temel tabakaları vasıtasıyla taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup, stabilitesi, adezyon kuvveti, dane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır [13].

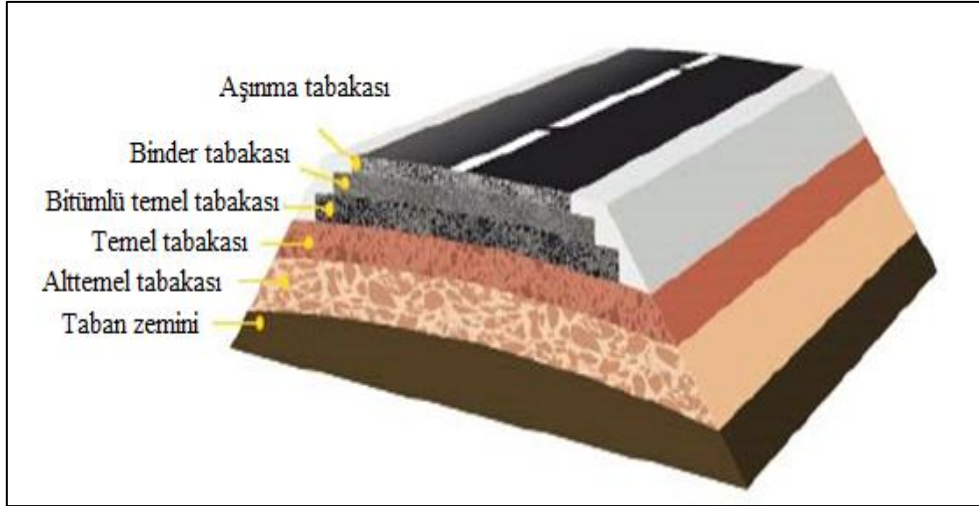
Bir esnek üstyapı, kaplama tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakalarından oluşur ve üstyapının üst kısmından taban zeminine inildikçe, tabakalarda kullanılan

malzemelerin fizik ve mekanik özellikleri, kaliteleri düşer. Bu tabakaların kalınlıklarını belirleyen ölçütler proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zeminini dayanımı gibi ölçütler göz önünde bulundurulmaktadır. Bir esnek üstyapıda en üstteki tabaka kaplama tabakasıdır. Bu tabaka aşınma ve binder olarak iki kısımdan oluşur. Bu tabakanın trafiği emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir. Ayrıca aşınma tabakalarının, taşıtlardan su sıçramasını ve yol yüzeyindeki küçük havuzcukların oluşmasını önlemek için drenaj tesislerine de sahip olması gereklidir. Aşınma tabakasında binder tabakasına göre daha ince malzeme kullanılır [18].

Aşınma tabakasının altında, üstyapının oturduğu doğal zemin olan taban zeminini koruyan temel tabakası bulunur. Bu tabakanın görevi taşıtların geçişlerinden dolayı gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içinde yaymaktır [19]. Esnek üstyapı tabakaları aşınma tabakası, binder tabakası, temel ve alt temel tabakasından oluşmaktadır [20]. Bitümlü kaplama kesiti Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Şekil 1.3’te ise bir esnek üst yapının katmanları gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Bitümlü kaplama kesiti [21].



Şekil 1.3. Esnek üstyapı katmanları [22].

1.1.2.1. Taban Zemini

Taban zemini sıkıştırılmış doğal zeminden oluşur. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir [16]. Taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 150 cm altında tutulmalı, bunun da sağlanması için uygun yeraltı drenajı yapılmalıdır. Ayrıca uygun drenaj sistemi ile yüzey suyunun yol gövdesini etkilemesi önlenmelidir [23].

Yarma veya dolgu her türlü zemin ilgili şartnameye göre sıkıştırılıp şekillendirilir. Üstyapı kalınlığının belirlenmesinde taban zemini önemlidir. Fakat bununla birlikte don etkisinden kaynaklanan bozulmalar da hesaba katılması gerekmektedir. Zemin sağlamlığı da CBR ölçeğine göre değerlendirilir [24]. Don olayının yol üstyapısına olan etkisinin azaltılabilmesi için aşağıdaki faktörlerin incelenmesi gerekir;

- Taban zeminin dona karşı hassasiyeti
- Üstyapının toplam kalınlığı
- Donma indeksi
- Yeraltı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği
- Güzergahtaki yarma ve dolgu yükseklikleri [23].

1.1.2.2. Alt Temel Tabakası

Esnek üstyapılarda düşük elastisite modülüne sahip taban zemininin üzerine inşa edilen tabakadır. Bu tabakanın görevleri; üst tabakalardan gelen trafik yüklerini taban zeminine üniform olarak iletmek, taban zemininde bulunan suların ıslahını sağlamak, kış

aylarında don olayını önlemek, temel tabakasını elverişli yüzey oluşturmak ve üst tabakalardaki malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini korumaktır.

1.1.2.3. Temel Tabakası

Temel tabakası, trafik yüklerini alt tabakalara iletmek, üstyapının stabilitesini artırmak, drenajı sağlamak, alt tabakaları don olayının olumsuz etkilerinden korumak, düzgün taşıma yüzeyi elde etmek, çalışma platformu oluşturmak, üstyapının taşıma gücünü artırmak ve rijit üstyapıda pompaj hasarını önlemek amacıyla inşa edilmektedir [25].

Karayollarında üç farklı temel tipi uygulanmaktadır;

- Granüler temel (GT)
- Plent-Miks temel (PMT)
- Çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT) [26].

1.1.2.4. Kaplama Tabakası

Kaplama tabakasının görevleri; planlanan trafik yüklerini taşımak, kaymaya, trafiğin aşındırma ve iklim koşullarının ayrıştırıcı etkisine karşı koymak, seyahat konforu ve su yalıtımı sağlamaktır. Üstyapının en üst tabakası olup genellikle;

- Asfalt betonu
- Sathi kaplama olarak inşa edilir [27].

1.1.2.4.1. Binder Tabakası

Binder tabakası, aşınma tabakası ile temel tabakası arasına serilen ve esnek üstyapı tabakasının yapısal bileşenidir. Binder tabakasının amacı, aşınma tabakasından iletilen trafik yükünü temel tabakasının taşıma kapasitesini aşmayacak şekilde iletmek ve tekrarlı yüklerin etkilerine karşı direnç göstererek kalıcı deformasyonun ve çatlamların meydana gelmesini engellemektir. Binder tabakasının serilmesi aşınma tabakasının serilmesi için uygun yüzey oluşturmaktadır. Trafik yükünün az olduğu bölgelerde binder tabakası uygulanmaya bilinmektedir [28, 29].

1.1.2.4.2. Aşınma Tabakası

Aşınma tabakası, üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalıdır. Aşınma tabakasının yeterli sürtünme katsayısına sahip olması, taşıtlar için düzgün yüzey sağlaması, gürültünün kontrolü, tekerlek izi direncine sahip olması ve geçirimsiz bir yüzey oluşturularak drenaj sağlaması gibi özellikleri nedeniyle diğer tabakalara göre en yüksek kalitedeki malzemeler ile yapılmaktadır ve diğer tabakalara göre maliyeti fazladır [28, 30, 31].

1.1.3. Kompozit Üstyapı

Kompozit üstyapı yani diğer bir adıyla yarı rijit üstyapı, karayolu üstyapısında deforme olmuş esnek üstyapıya beton takviyesi ile güçlendirilmesi veya deforme olmuş rijit üstyapının bitümlü sıcak karışımla onarılması sonucu elde edilir. Kompozit üstyapılar maliyeti yüksek olduğundan dolayı pek tercih edilmez. Ancak bu uygulamanın yapıldığı yol kesimlerinde, yapımdan hemen sonra çimentodan kaynaklanan enine büzülme çatlakları oluşabilir. Onarımı zor olan bu bozukluklar nedeniyle otoyollarda kompozit üstyapı tekniğinden vazgeçilmiştir [32].

1.2. Esnek Üstyapıda Kaplama Tabakasında Kullanılan Bitümlü Karışımlar Ve Özellikleri

1.2.1. Bitümlü Karışımlar

Bitümlü karışımlar, agregası ve uygun oranda karıştırılan bitümlü bağlayıcılardan elde edilmektedir. Bitümlü karışımlarda kohezyon, bitümlü malzemeler tarafından sağlanırken, agregalar karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır [33].

Bitümlü karışımlar;

- Aşınma
- Binder
- Bitümlü temel

tabakalarında kullanılır. Trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz olduklarından dolayı temel ve alt temel tabakalarına nazaran daha stabil ve durabil olmalıdırlar [33].

1.2.2. Bitümlü Karışımların Sınıflandırılması

Bitümlü karışımlar, karışımda kullanılan agreganın ısıtılıp ısıtılmamasına bağlı olarak ‘Sıcak Karışımlar’ ve ‘Soğuk Karışımlar’ olmak üzere ikiye ayrılır.

1.2.2.1. Bitümlü Soğuk Karışımlar

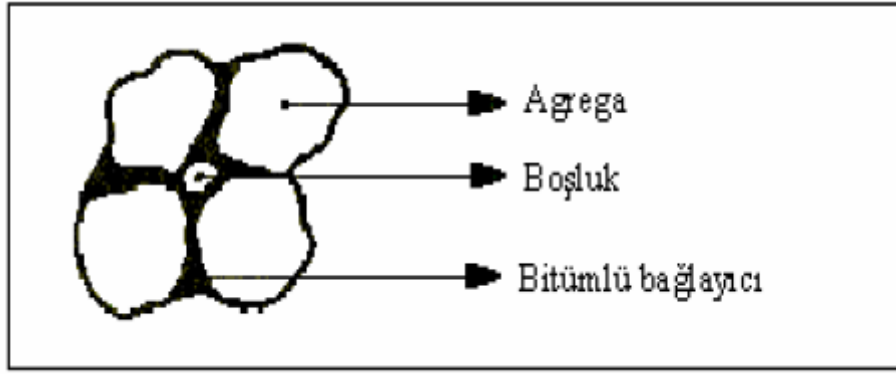
Asfalt emülsiyonunun veya katbek asfaltın, agrega ile soğuk halde ya da agrega yüzeyindeki nemin kurumasına yetecek kadar sıcaklıkta karıştırılması ile elde edilen karışımlara soğuk karışımlar denir. Ülkemizde çok yaygın olarak kullanılmayan soğuk bitümlü karışımlar, genel olarak kışın acil onarım işlerinde ve asfalt plentinin olmadığı veya ekonomik olmadığı durumlarda çok küçük miktarda bitümlü karışım gereken yerlerde kullanılmaktadır [34].

Soğuk karışımlar kendi içinde ikiye ayrılırlar:

- **Yarı Yoğun Granülometrilik Soğuk Karışımlar:** Esası asfalt çimentosu olan asfalt emülsiyonlu yarı yoğun soğuk karışımlarda boşluk oranı % 12’den azdır. İlk dayanımları az olmasına karşılık, zamanla dayanımları artış gösterir.
- **Açık Granülometrilik Soğuk Karışımlar:** Boşluk oranı % 12’den fazla olan bitümlü karışımlardır. Mukavemetleri çok yüksektir. Ekonomik açıdan uygun olup tekerlek altında deforme olmazlar [34].

1.2.2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Karayolu kaplamalarının yaklaşık % 13’ü Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) olarak yapılmıştır. BSK, oranları belirlenmiş bitümlü bağlayıcı, agrega ve fillerin sıcaklık, nem faktörlerine dikkat edilerek karıştırılmasıyla elde edilen yol kaplama malzemesidir. BSK, Şekil 1.4’deki gibi üç fazdan oluşmuş bir sistem gibidir.



Şekil 1.4. Bitümlü sıcak karışımın yapısı [38].

BSK'lar, agreg, bitüm ve boşluk olmak üzere üç fazlı bir yapıdan oluşmaktadır. Agreg katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar gaz fazını oluşturlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yükleme zamanı ile değişkenlik gösterir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yükleme durumunda, elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansımak suretiyle karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki gösterir. BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar -tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışdır [39].

BSK'lar, bir asfalt plentinde agreg ile asfalt bağlayıcının sıcak olarak karıştırılarak yola nakledilmesini müteakip sıcak olarak sıkıştırılmasıyla imal edilmektedirler. Sıcaklık artışı ile birlikte bitüm agregaya püskürtülerek karıştırılır. Meydana gelen karışım soğuduğunda oldukça katı ve dayanıklı bir yapı oluşur [40, 41].

Yüksek standartlı karayollarında, otoyollarda ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için BSK'lar kullanılmaktadır. BSK, karışımda kullanılan agreg granülometrisi sınıflarına göre dört gruba ayrılırlar:

- **Açık gradasyonlu sıcak karışımlar:** Bu karışımlarda ince agreg oranı çok az, dolayısıyla boşluk oranı çok olup % 12'den fazladır. Makadam tipi kaplamalar bu sınıfa girer.

- **Kesikli gradasyonlu sıcak karışımlar:** Ara boyutlu malzeme çok azdır veya hiç yoktur. Boşluk oranı % 8-12 arasında olan bu tür karışımlar, pürüzlü bir yüzey verirler ve tekerlek izine karşı dirençleri yüksektir.
- **Yoğun gradasyonlu sıcak karışımlar:** Agregada granülometrisi düşük boşluk verecek şekilde süreklilik gösterir. Boşluk oranı % 8'den azdır. Bitümlü temel ve asfalt betonu bu sınıfa girer.
- **Harç tipi sıcak karışımlar:** İnce malzeme oranı fazladır. Bu tür karışımlarda boşluk oranı çok düşüktür, bitüm yüzdesi çok yüksek olduğundan penetrasyonu düşük asfalt kullanılır. Beton ve çelik köprüler üzerinde de kullanılan mastik asfalt ve gussasfalt bu tür kaplamalara örnek olarak verilebilir [37, 42].

1.2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agrega; doğal, yapay veya her iki tip mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış veya kırılmamış tanelerinin bir yığındır. En geniş tarifiyle agrega kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerden ibaret olup bağlayıcı bir ortamda, bitümlü bir karışım, beton, harç, makadam, mastik ve benzeri uygulamalar için veya bağlayıcısız bir ortamda kullanılmak üzere bir araya getirilmiş malzeme olarak tanımlanır. Esnek üstyapı performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, bağlayıcısız temel ve alt temel tabakalarının tamamını, bitümlü sıcak karışımların ise ağırlıkça % 90-95'ini, hacimce ise % 80-85'ini teşkil etmektedir. Hem kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı hem de çok büyük miktarda gereksinim duyulmasından dolayı agrega önemli bir yol malzemesidir ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [43].

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar boyut bakımından kaba agrega, ince agrega ve mineral filler olarak üç gruba ayrılmaktadır. Agregada karışımının 4,75 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı kaba agrega, 4,75 mm'lik elekten geçen ve 0,075 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı ince agrega, 0,075 mm'lik elekten geçen kısmı ise mineral fillerlerdir [45].

Kaba agregalar genellikle küresel şekilli çakıllardır. İnce agregalar, dere yataklarından elde edilen doğal kumlar ya da taş ocaklarında iri agregaların istenilen boyutta kırılması sonucu imal edilen kumlardır. Bitümlü karışımlarda kullanılacak ince agrega seçilirken hassas davranılmalı ve köşelilik durumu test edilmelidir [45].

Mineral filler, agregada karışımında küçük miktarlarda kullanılmasına rağmen, karışımın özelliklerini önemli oranda etkiler. Mineral filler genelde agregada karışımın içinde % 3-9 oranları arasında kullanılır [46].

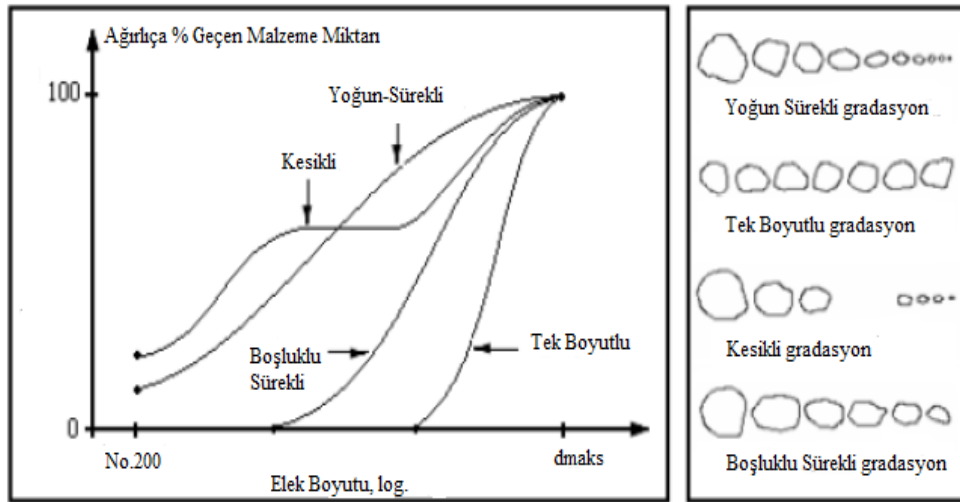
Agregalar, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla minerolojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı ve özgül ağırlık olarak sınıflandırılmakta ve bu özelliklere göre uygun olup olmadıkları belirlenmektedir [47].

1.2.3.1. Agregaların Mineralojik Olarak Sınıflandırılması

Agregalar kökenlerine göre “Doğal Agregalar” ve “Sunî (yapay) Agregalar” olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğal agregalar kayalardan fiziksel yolla elde edilen kum çakıl gibi granüler malzemelerdir. Dere yataklarından ya da taş ocaklarından temin edilirler. Sunî agregalar endüstriyel işlemler sonucunda elde edilirler. Asfalt kaplamalarda genellikle kullanılan sunî agregalar cüruf, klinker ve çimentodur. Sunî agregalar, genellikle gevrek ve poroz özellikte olduklarından yeterince üretimi sağlanamayıp üretilen miktarları ise çimento sanayilerinde kullanılmaktadır. Bu nedenle yol kaplamalarında çok tercih edilmemektedir. Bitümlü karışımlarda kullanılacak en ideal agregada, doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş agregalardır [33, 48].

1.2.3.2. Agregalarda Gradasyon

Gradasyon, agregada karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile öngörülmektedir. Agregalar gradasyon bakımından kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Bu gradasyon tipleri Şekil 1.5’de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse farklı özelliklere sahip oldukları görülebilir.



Şekil 1.5. Agreg gradasyon tipleri ve görsel dağılımı [44].

Kesikli gradasyona sahip agregalar, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediklerinden boşluk miktarları fazladır bundan dolayı yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden dolayı boşluk oranı yüksektir, bu nedenle drenaj, filtre vb. amaçlar ile dona duyarsız tabakalar için kullanılırlar ancak sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Tek boyutlu gradasyon hemen hemen aynı boyuttaki agregalar ihtiva ettiğinden sathi kaplama ve koruyucu örtü tabakası gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agreg boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük, dolayısıyla yoğunluğu yüksektir. Bu sebeple, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir [17, 44].

1.2.3.3. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı

Agrega danelerinin biçimleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti özelliklerine etki etmektedir. Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür. Köşeli agreg danelerinin temas noktaları sayısı çok olduğundan içsel sürtünme açıları ve daneler arasındaki kenetlenme ve stabilitesi daha fazla olmaktadır.

Agregaların yüzey yapısı; agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğünü veya cilalılık durumunu ifade eden ve agreganın bağlayıcı ile kurduğu bağ üzerinde önemli etkisi olan bir parametredir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir kenetlenme meydana getirerek güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilmektedirler [17, 44].

1.2.3.4. Agregalarda Porozite

Porozite, malzemelerdeki boşluk hacminin, malzemenin tüm hacmine oranı olarak ifade edilmektedir. Agregada danelerinin porozitesinin belirli bir düzeyde olması gerekir. Porozitenin yeterli düzeyde olması, bitümün agrega daneleri tarafından emilerek agrega ile bağlayıcı malzeme arasında kuvvetli bir adezyon kuvvet oluşmasını, stabilitenin ve durabilitenin artmasını sağlar. Porozite belirli bir düzeyden fazla olursa agreganın özgül ağırlığı, stabilitesi ve donma-çözölmeye karşı direnci azalmaktadır [33].

1.2.3.5. Agregalarda Yüzey Alanı ve Boşluk

Agregada danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcısız veya bağlayıcı karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi, gradasyon, dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artacağından gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca boşluk miktarının artması ile karışımın yoğunluğu azalacaktır. Kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir [17, 44].

1.2.3.6. Agregalarda Özgöl Ağırlık

Agreganın özgül ağırlığı, agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır.

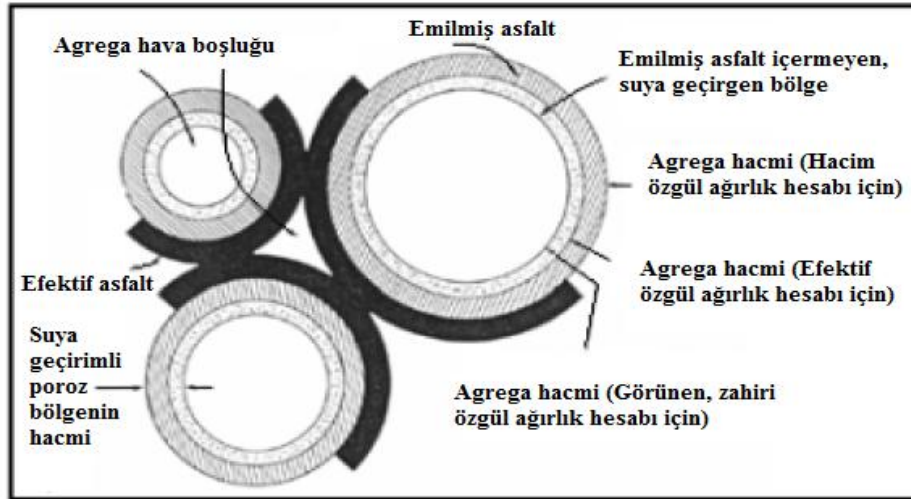
Danenin, hacim tanımlamasına bağlı olarak, üç tane özgül ağırlık türü vardır.

- **Zahiri Özgöl Ağırlık (G_{sa}):** Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.
- **Hacim Özgöl Ağırlığı (G_{sb}):** Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve

hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

- **Efektif Özgöl Ağırlık (Gse):** Belirli bir sıcaklıkta agreganın bitüm geçirimli boşlukları hariç geçirimli ve geçirimsiz boşluklarının içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır [27].

Agreganın özgül ağırlığı, bitümlü sıcak karışımda kullanılacak bağlayıcı oranını belirlemede yardımcı olmaktadır. Asfalt karışım hesaplarında kullanılan agreganın seçilecek olan özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru olarak veren özgül ağırlık olmalıdır. Şekil 1.6'de özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan agreganın hacim tanımlamaları görülmektedir.



Şekil 1.6. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri [44].

Hesaplamalarda zahiri özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgül ağırlık, agreganın tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından, sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu vermektedir [44].

1.2.3.7. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu yol kaplamalarının tüm fiziksel özelliklerine doğrudan veya dolaylı olarak etki eder. Bu nedenle agreganın fiziksel özellikleri yol kaplamalarının gerek stabilite gerekse performansı için çok önemlidir.

Agregaların stabilitesi, trafik yüklerinden veya zeminin hacim değiştirmesinden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Stabilite; kayma mukavemeti, CBR, esneklik modülü veya yatak katsayısı ile ölçülüp belirlenir. Agregaların kayma mukavemeti kesme kutusu testi ile tayin edilir ve Eşitlik 1.1’de verildiği gibi hesaplanır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1.1)$$

Burada;

τ :Kayma mukavemeti (kg/cm²)

c :Kohezyon (kg/cm²)

σ :Kayma düzlemine dik normal basınç (kg/cm²)

ϕ :İçsel sürtünme açısı (derece) [17].

Eğer agrega bir bağlayıcı ile karışım yapmış ise belirli bir kohezyona sahiptir ancak temel tabakaları gibi bağlayıcısız ise $c=0$ olacağından tüm kayma mukavemeti içsel sürtünme tarafından sağlanır. Bu sebeple yol kaplamalarının mukavemet ve deformasyon direncinden başlıca sorumlu olan agregaların içsel sürtünme açısıdır. Agregaların içsel sürtünme açıları; danelerin yüzey pürüzlülüğü arttıkça, agrega danelerinin açısallığı arttıkça, boşluk oranı azaldıkça, dane çapı büyüdükçe, yoğun-sürekli bir gradasyona sahip oldukça, yassı ve uzun dane azaldıkça, filler miktarı azaldıkça ve daneler arasındaki kenetlenme arttıkça artmaktadır. Dolayısıyla içsel sürtünme açısına etki eden tüm bu parametreler kaplamanın stabilitesi içinde önemlidir. Ancak agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü ile açısallığı en önemli etkenlerdir. Bu nedenle yol kaplamalarında muhakkak kırmataş agrega kullanılmalıdır.

Agregaların durabilitesi, kırılma aşınma ve parçalanmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Agregalar kompaksiyon ve trafik etkileri altındaki mekanik etkilerle kırılmaya maruz kalırlar. Bu nedenle kaplamanın üst tabakalarında kullanılan agregaların alt tabakalarda kullanılan agregalara kıyasla kırılmaya karşı daha dirençli olmaları gerekmektedir. Aşınma (digradasyon) tekerrür eden trafik yükleri altında agrega danelerinin çok küçük parçalar halinde ufalanmasıdır. Aşınma ile ince malzeme miktarı artarak agreganın gradasyonu bozulur ve dren kabiliyeti azalır. Parçalanma (disintegrasyon) agrega danelerinin mekanik etkilerden ziyade fiziko-kimyasal etkiler ile parçalanmasıdır. Bu tip aşınma, suyun etkisi, agreganın porozluğu ve minerolojik yapısı ile ilgilidir. Agrega danelerinin emdiği suyun donması sonucu yaptığı hacim genişlemesinin

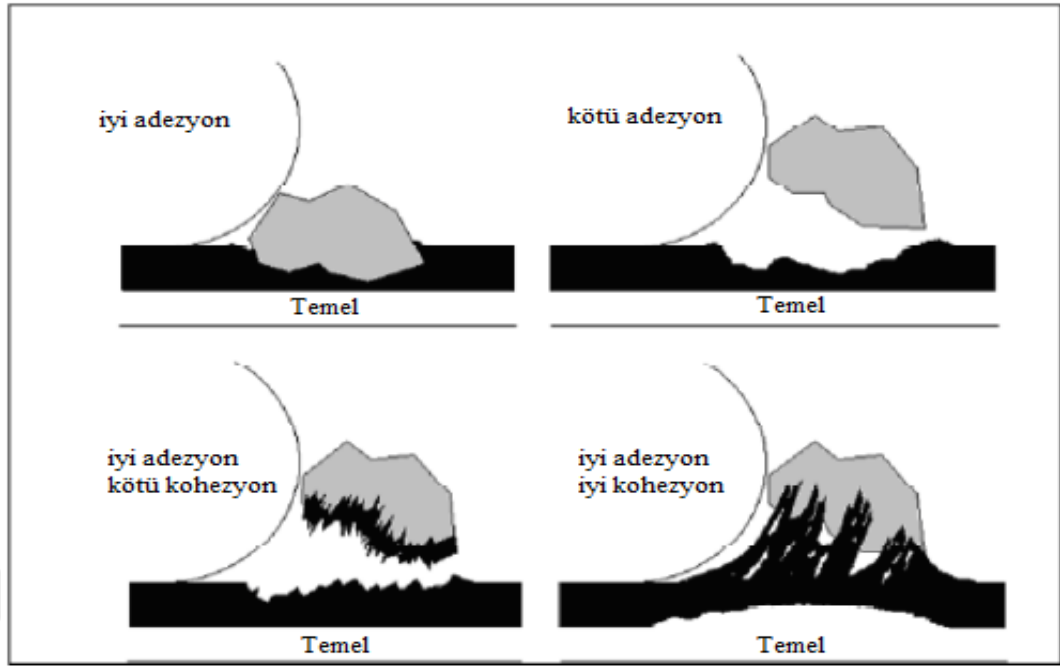
oluşturduğu ilave gerilmeler ve donma-çözünme periyotlarının sıklığı ile agregada daneleri parçalanmaya maruz kalırlar.

Yol kaplamalarında kullanılan tüm malzemeler suyla temas halindedir. Bu nedenle bitümle kaplı agregada danelerinin suyun etkisi ile soyulmaması için agregada ile bağlayıcı arasındaki adezyonun yüksek olması gerekir. Agregaların adezyon kabiliyeti bitümün viskozitesi arttıkça, yüzey pürüzlülüğü arttıkça, porozluk veya absorpsiyon arttıkça, yüzey alanı arttıkça (dane çapı küçüldükçe), yüzeysel çekim enerjisi ve kimyasal reaksiyonlar arttıkça, karıştırma ısısı arttıkça, agreganın nemi azaldıkça ve agreganın temizliği arttıkça artar [17].

1.2.4. Bitümlü Bağlayıcılar

BSK'nın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bitümlü bağlayıcılar karışım içerisinde ağırlıkça % 5-7, hacimce % 13-15 oranlarında kullanılsa da esnek kaplamaların en önemli bileşenidir. Bitümlü bağlayıcılar BSK içerisinde agregada danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini artırmakta ve karışım içerisindeki boşlukları doldurarak kaplamanın geçirimsizliğini sağlamaktadır [43].

BSK'nın stabilitesi agregada danelerini saran bitüm filminin agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyon yeteneği yüksek ise karışımın kohezyonu da yüksek olacaktır [39]. Şekil 1.7'te bitüm ile agregada arasındaki adezyon-kohezyon davranışı gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Bitüm ile agrega arasındaki adezyon-kohezyon davranışı [44].

Bitüm, Amerika Malzeme ve Test Birliği (American Society for Testing and Materials, ASTM) tarafından, esas olarak asfaltlar, katranlar, ziftler ve asfaltitler gibi yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşan, doğal ya da üretilmiş, siyah veya koyu renkli, katı, yarıkatı veya viskoz, karbon disülfürde tamamen çözünen bağlayıcı madde olarak tanımlanır [43]. Bitümler katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile ham katran olarak elde edilirler ve yol inşaatında kullanılabilmeleri için ikinci bir damıtma işleminden geçirilirler [44].

Asfalt ise ASTM tarafından rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, ana maddesi bitüm olan, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilmektedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri asfalt kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılabilmektedir. Asfalt malzemesi dayanıklılığı, agregaya güçlü yapışma özelliği ve kaplamada oluşturduğu yüksek geçirimsizlik nedeniyle karayolu mühendisliğinde bağlayıcı madde olarak değer kazanmıştır. Yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile katı veya yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu olarak isimlendirilen petrol asfaltlarıdır. Tabiatda doğal halde bulunan kaya ve göl asfaltları birtakım ayrıştırma işlemlerinden geçtikten sonra yol kaplamalarında kullanılabılır ve genellikle bitümlü karışımlara modifiye amaçlı katılmaktadırlar [43].

1.2.4.1. Kaplama Sınıfı Bitümler

Kaplamalarda kullanılan bitümler petrol kökenli malzemelerdir. Kaplama sınıfı bitümler B sembolü ile gösterilir. Kaplama sınıfı bitümler, kıvam durumunu ifade eden penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılır.

Kaplama sınıfı bitümler, penetrasyon derecelerine göre aşağıdaki sınıflara ayrılır:

- B 20-30 Penetrasyonlu
- B 30-45 Penetrasyonlu
- B 35-50 Penetrasyonlu
- B 40-60 Penetrasyonlu
- B 50-70 Penetrasyonlu
- B 70-100 Penetrasyonlu
- B 100-150 Penetrasyonlu
- B 160-220 Penetrasyonlu
- B 250-330 Penetrasyonlu
- B 330-430 Penetrasyonlu
- B 500-650 Penetrasyonlu
- B 650-900 Penetrasyonlu

Normal hava sıcaklığında en sert kıvamlı bitüm B 20-30 penetrasyonlu bitüm olup rakam büyüdükçe sertlik azalmaktadır [48, 49].

1.2.4.2. Bitümün Kimyasal Bileşenleri

Bitümlerin kimyasal yapıları çok karmaşık olduğundan dolayı mühendislik özellikleri daha çok fiziksel özellikleri vasıtasıyla belirlenir. Bitümlerin çoğu % 82-83 oranında Karbon, % 8-11 oranında Hidrojen, % 1-6 oranında Sulfür, % 0-1,5 oranında Oksijen, % 0-1 oranında Nitrojen ve çok miktarda metal gibi bileşenlerden meydana gelmektedir [33].

Kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olduğundan bitümün kimyasal analizini yapmak oldukça zahmetlidir ayrıca (eğer mümkün ise) yapılan bu analizlerden, bitüm reolojisi ile korelasyon kurmayı imkansız hale getirecek miktarda veri ortaya çıkmaktadır. Fakat bitümü n-heptan içerisinde çözünmeyen asfaltlar ve çözünen maltenler olarak iki geniş kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Maltenlerde ayrıca doymuşlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılmaktadır [50].

Asfaltlenler, esasen karbon ve hidrojenenden oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılar olup asfaltın % 5 ila % 25'ini oluştururlar. Asfaltlenler genel olarak oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip polar ve karmaşık maddelerdir. Asfaltlen miktarının artırılması ile daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Reçineler, koyu kahverengi renkte, katı veya yarı katı kıvamda ve doğal elektriksel yüklere sahip (polar) olması nedeniyle asfaltlara yüksek adezyon özelliği kazandırmaktadır. Aromatikler, asfaltın % 40 ile % 60'ını oluşturan, asfaltlenlerin yayılımı için gereken ortamı teşkil eden, koyu kahve renkli, viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı bileşenlerdir. Doygunlar veya doygun hidrokarbonlar ise asfaltın % 5 ile % 20'sini oluşturan, saman rengi veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır [44, 50].

Bitüm, yapısal anlamda asfaltlenlerin maltenler içerisinde çözünmüş veya dağılmış olduğu bir süspansiyon sistemi olarak tanımlanabilir. Bu oluşum özelliği bakımından bitümler, SOL (zelti) ve JEL (jelatin) olmak üzere iki tipte değerlendirilmektedir. SOL tipi bitümlerde asfaltlenler, malten içinde çok iyi bir biçimde yayılıp dağılmışlardır (penetrasyon asfaltları). JEL tipi bitümlerde ise asfaltlenler, malten içinde çok az yayılmış, bir bakıma kümelenmiş bir yapı göstermektedir (okside asfaltlar) [43].

Bitm oluşturan kimyasal bileşenlerin kendi içerisindeki oransal değişimlerin bitüm özelliklerine etkisi şu şekilde özetlenebilir: Asfaltlen içeriği sabit iken, doygunların reçinelere oranı sabit tutulup aromatik bileşen oranının artırılmasının reoloji üzerindeki etkisi azdır. Reçinelerin aromatiklere oranını sabit tutarak doygun içeriğinin artırılması bitümü yumuşatmaktadır. Reçine eklenmesi durumunda ise bitüm sertleşmekte, penetrasyon indeksi ve kayma hassasiyeti düşmekte, viskozite ise artmaktadır. Sabit sıcaklıkta maltenlerin içerisine karıştırılan asfaltlen konsantrasyonu artırıldığında bitümün viskozitesi yükselmektedir. Bitmde bulunan asfaltlenlerin aromatik/naftenik halka şeklinde yapılardan oluşmuş, levhaya benzer tabaka yığınları şeklinde olduklarına inanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bu tabakaları birarada tutan hidrojen bağları kopmakta ve bunun sonucu olarak asfaltlenlerin hem şekilleri hem de boyutları değişmektedir, bu değişimde viskozite azalması olarak sonuçlanmaktadır [50].

1.2.4.2.1. Bitümün Özgöl Ağırlığı

Bitümlerin özgöl ağırlıkları temin edildikleri ham petrolün kaynağına bağlı olarak 25°C’de 0,97 ile 1,05 arasında değişmektedir. Düşük penetrasyonlu asfalt çimentolarının özgöl ağırlıkları yüksek penetrasyonlu asfalt çimentolarına göre daha yüksektir [51].

1.2.4.2.2. Bitümün Hacimsel Genişlemesi

Bitümün hacimsel genişleme katsayısı, $6,1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ civarındadır ve agreganın hacimsel genişleme katsayısından yaklaşık 10 kat daha yüksektir. Bu nedenle asfalt kaplamadaki boşluk miktarı yetersiz ise yüksek sıcaklıklarda bitüm agregadan daha fazla genişir ve kaplama yüzeyine çıkar. Bu olaya terleme denir [51].

1.2.4.2.3. Bitümün Isıl Özellikleri ve Isıya Duyarlılığı

Bitümlerin ısı iletkenlikleri agregaya nazaran daha düşüktür. Bu sebeple bitümlü karışımlarda farklı büzülme ve genişlemelerin neden olduğu ilave gerilmeler meydana gelmektedir [51].

Bitümler termoplastik malzemelerdir ve viskoziteleri ısıya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bitümün kıvamının ısıya göre değişmesi, ısıya duyarlı olduğunu göstermektedir. Bitümlerin ısıya duyarlılığı, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile tespit edilen penetrasyon indeksi değeri ile belirlenebilmektedir [51].

1.2.4.2.4. Bitümün Reolojik Özellikleri

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu, sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresine de bağlı olarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm reolojik bir malzeme olup trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak viskoelastik ve termoplastik özellikler gösterir. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [43].

Sıcak iklim koşullarında ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda, asfalt çimentosu viskoz davranır ve akmaya başladıklarında, soğuma olsa bile hiçbir zaman eski (orijinal) durumlarına gelemedikleri için plastik olarak nitelendirilir. Bu koşullarda sıcak asfalt karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda ve tekrar

eden tekerlek yükleri altında düşük stabiliteye sahip olan sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izleri oluşur [43].

Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, asfalt çimentosu elastik bir katı gibi davranış gösterir. Elastik katı malzemeler yüklendiklerinde şekil değiştirirler, ancak üzerindeki yük kaldırıldığında önceki (orijinal) hallerine geri dönme yeteneğine sahiptirler. Bu malzemelere taşıma kapasitesinden daha fazla yükleme yapıldığında, malzeme bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Asfalt çimentosu düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı ise de aşırı yüklendiğinde kırılabilir ve çatlayabilir. Bu yüzden asfalt kaplamalarda soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Bu duruma, düşük sıcaklık nedeniyle kaplama yüzeyinin büzülme çalışmasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur [43].

1.2.5. Bitümlü Karışımlarda Aranılan Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü tam olarak sağlayabilecek bitümlü karışım elde etmek bugün itibarıyla hemen hemen mümkün değildir. Ancak karışımların yapılabilmesi ve uygulamada ideal bitümlü kaplamaların oluşturulabilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi gerekir [42].

Agrega-asfalt karışımlarının yol kaplaması olarak kullanılabilmesi, istenilen verimin alınabilmesi ve düşünülen hizmet süresini bozulmadan tamamlayabilmesi için belirli bazı özelliklere sahip olması ve bazı koşulları sağlaması gerekir. Bu koşul ve özellikler teknik şartnamelerde verilmiştir. Karışımların dizayn edilmeleri sırasında aşağıdaki özellikler dikkate alınır:

- Stabilite
- Durabilite
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulmaya karşı direnç
- Kaymaya karşı direnç [34].

1.2.5.1. Stabilite

Asfalt kaplamanın stabilitesi, trafik yüklerine, ötelenme ve tekerlek izleri oluşmayacak şekilde direnç gösterme yeteneğidir. Stabilite trafik yüklerini karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Ancak çok yüksek stabilite, çok sert bir karışım anlamına gelir ki bu tür kaplamalar trafik yükleri altında oluşan defleksiyonlara uyamayıp çatırlar. Bu nedenle düşük stabilite gibi çok yüksek stabilite de zararlıdır [34].

Stabilite, agregalar arası içsel sürtünmeye ve bitüm-agrega kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arası içsel sürtünme agregada danesinin şekli ve yüzey yapısı ile ilgilidir. Kohezyon, yükleme hızı ve asfaltın viskozitesi arttıkça, kaplama ısısı azaldıkça artar. Ayrıca asfalt yüzdesinin bir noktaya kadar artmasıyla kohezyon da artar. Ancak bitüm filmi daha fazla arttığında, içsel sürtünme ile birlikte stabilite de azalır [36]. Düşük stabiliteye neden olan etkenler ve etkileri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Düşük stabilite sebep ve etkileri

DÜŞÜK STABİLİTE	
Sebep	Etki
Yüksek asfalt %’si	Oluklaşma, tekerlek izinde oturma ve kuma
Karışımında fazla kum %’si	Sıkıştırma sırasında ve inşaat sonrasında yumuşaklık, sıkıştırma zorluğu
Yuvarlak agregada, kırılmamış veya az kırılmış agregada yüzeyi	Tekerlek izinde oturma

Stabiliteyi sağlayan mekanik kenetlenmedir. Mekanik kenetlenme, agreganın granülometrisinin uygun, sürtünme yüzeylerinin fazla ve pürüzlü olmasıyla doğru orantılıdır. Eleme ve kırılma işlemi doğru şekilde yapılan agreganın yüzeyleri uyumlu ve pürüzlülüğü daha fazla olur. Karışımlardaki kohezyon kuvveti bitümlü malzeme ile daneler arasındadır. Bitümlü malzemenin fazla olması kohezyon kuvvetini arttırmasına karşılık, belli bir miktardan fazlası yağlama etkisi göstererek danelerin birbirini üzerinden kaymasına neden olacaktır. Bu da mekanik kenetlenmeyi, dolayısıyla stabiliteyi azaltır. Bu sebeple deneylerle optimum bitüm miktarının belirlenmesi gerekir.

Her yolun üstyapısının ihtiyacı olan trafik yüklerine eşdeğer bir stabiliteyi temin etmek için, mekanik kenetlenmeyi maksimum yapacak mineral agregada, düşük penetrasyonlu optimum bitümlü malzeme ve serme sıkıştırma tekniğinin doğru biçimde uygulanması yeterli olmaktadır [42].

1.2.5.2. Durabilite (Dayanıklılık)

Bitümlü bir kaplamanın dayanıklılığı, trafik, su, hava ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı gösterdiği dirençle ifade edilir. Bu dış etkiler sebebiyle, kaplamanın iç bünyesinde oksidasyon, polimerizasyon ve gazlaşma meydana gelir. Başka bir ifadeyle karışımın durabilitesi, karışımdaki asfalt özelliklerinin değişmesine, agreganın kırılmasına ve asfaltın agrega yüzeyinden soyulmasına karşı gösterilen dirençtir [42].

Yüksek durabilite, yüksek asfalt %'si kullanarak, yoğun gradasyonlu, soyulma direnci yüksek agrega kullanarak ve karışımı en yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn edip sıkıştırarak sağlanır. Düşük durabiliteye neden olan bazı sebepler ve etkileri Tablo 1.2'de verilmiştir [34].

Tablo 1.2. Düşük durabilite sebep ve etkileri

DÜŞÜK DURABİLİTE	
Sebepler	Etkiler
Düşük asfalt %'si	Kuru bir görünüş, agregaların sökülmesi
Yetersiz sıkışma ve dizayn hatası nedeniyle yüksek boşluk %'si	Kırılma ve ayrışmaya neden olan asfaltın erken yaşlanması
Soyulmaya karşı hassas agrega kullanılması	Asfaltın agregadan soyulması ve agregaların sökülmesi

1.2.5.3. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik bitümlü sıcak karışımların, içlerine hava ve su girmesine karşı gösterdiği dirençtir. Kaplamadaki boşluk miktarı ve boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki su, hava ve gazların kaplama içine geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Geçirimsizlik azaldıkça hava ve su etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın geçirimsizliği, karışımın asfalt miktarı, yoğunluğu ve sıkıştırması arttıkça boşlukları azalacağından artacaktır. Ancak, kaplamada yeterli stabilite sağlanması, sıcak havalarda kusmanın engellenmesi ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla bir miktar boşluk bırakmak gereklidir. Bunun yanında, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır [43].

Bitümlü temel tabakalarında boşluk oranı % 5-9, binder tabakasında % 4-6 ve aşınma tabakasında ise % 3-5 arasında olmasının arzu edilme nedeni geçirimsizliği sağlamak ve

yoğunluğun artması içindir. Ancak kaplama yüzeyinin geçirimsizliğinin artması, kayma direnci yani sürüş emniyetinde azalmalara neden olur [42].

Geçirimsizlik, karışımdaki hava boşluğu yüzdesi ile belirlenir. Karışımdaki boşlukların, birbiri ile bağlantılı olması ve boşlukların yüzeye irtibatlı olması, geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörlerdir. Karışımları geçirimli yapan sebepler ve etkiler Tablo 1.3'te verilmiştir [34].

Tablo 1.3. Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler

GEÇİRİMLİLİK	
Sebe	Etki
Düşük asfalt %'si	İnce asfalt filmi erken yaşlanmaya ve sökülmeğe neden olur.
Karışım dizaynında yüksek boşluk %'si	Su ve hava kolaylıkla karışım içine girer, oksidasyona ve agregaların ayrışmasına neden olur.

1.2.5.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karıştırılma ve sıkıştırılmadaki kolaylık olarak ifade edilebilir. Çok fazla iri agrega bulunduran karışımlar kolay işlenebilir olmazlar. Fillerin de çok fazla kullanılması işlenebilirliği düşürür. Ancak işlenebilirliği çok iyi olan karışımlar yumuşak karışımlardır ve bunların trafik yükleri altında deforme olmaları kolaydır. İşlenebilirlik problemlerinin sebepleri ve etkileri Tablo 1.4'te verildiği gibi özetlenebilir [36].

Tablo 1.4. İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri

İŞLENEBİLİRLİK PROBLEMLERİ	
Sebe	Etki
Çok büyük dane boyutu	Pürüzlü bir yüzey, serim zorluğu
Çok fazla iri agrega	Sıkıştırma zorluğu
Çok düşük karışım sıcaklığı	Kaplanmamış agrega, düşük durabilite, pürüzlü bir yüzey, sıkıştırma zorluğu
Çok fazla ara boyutlu malzeme	Karışımın silindir altında ötelenmesi, sıkıştırma zorluğu
Düşük filler %'si	Yumuşak karışım, yüksek geçirgenlik
Yüksek filler %'si	Karışım çok kuru görünür, durabil olmaz ve işlenmesi çok zor olur.

1.2.5.5. Esneklik (Fleksibilite)

Esneklik, yolun alt tabakasında meydana gelen çökmelerden dolayı, bitümlü kaplama tabakalarına geçecek genel deformasyona, bitümlü tabakaların çatlamadan karşı koyabilme yeteneğidir. Sıcak karışım tabakaların, yük altında, tabandan ve üstten gelecek kuvvetlerin

etkisiyle bozulma, dağılma ve kırılma göstermeden direnimi, esneklik özelliği olarak ifade edilebilir. Bir başka deyişle, esneklik kaplamanın yorulmaya karşı direncini kaybetmemesidir [42].

1.2.5.6. Yorulmaya Karşı Direnç

Bir üstyapının yorulmaya karşı direnci trafik yükleri altında oluşan tekrarlanan eğilmeye karşı direncidir. Yetersiz sıkışma, yüksek boşluk yüzdesi, asfaltın yaşlanması ve sertleşmesi yorulma direncini azaltır. Üstyapının kalınlığı ve mukavemeti, taban zemininin taşıma gücü, üstyapı ömrünü etkileyen diğer faktörlerdendir. Tablo 3.5'te zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri verilmiştir [34].

Tablo 1.5. Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri

ZAYIF YORULMA DİRENCİ	
Sebe	Etki
Düşük asfalt %'si	Yorulma çatlağı
Yüksek dizayn boşluğu	Asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlağı
Yetersiz sıkışma	Asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlağı
Yetersiz üstyapı kalınlığı	Aşırı eğilmeyi takiben yorulma çatlağı

1.2.5.7. Kaymaya Karşı Direnç

Asfalt kaplama yüzeylerinde, özellikle yağışlı havalarda araç tekerleğinin kaymasına karşı oluşan dirence kayma direnci denir. Kayma direncinin yüksek olması için hem agregası sert ve pürüzlü olmalı hem de asfalt kaplama yüzeyi pürüzlü olmalıdır. Maksimum dane boyutu 1/2 in. veya 3/8 in. olan açık gradasyonlu karışımların kayma direnci yüksek olur. Tablo 1.6'da düşük kayma direnci sebep ve etkileri verilmektedir [36].

Tablo 1.6. Düşük kayma direnci sebep ve etkileri

DÜŞÜK KAYMA DİRENCİ	
Sebe	Etki
Yüksek asfalt %'si	Kusma, düşük kayma direnci
Agrega gradasyonunun kötü olması	Çok düzgün yüzeyli kaplama, suyun yüzeyden drene olmaması
Agrega cilalanma değerinin düşük olması	Düşük kayma direnci

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada materyal olarak kırmataş agregalar ve bitümlü bağlayıcılar kullanılmıştır. Kullanılan materyallere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.1. Çalışmada Kullanılan Agregalar

Bu çalışmada kalker, bazalt ve dere malzemesi olarak 3 tip agrega kullanılmıştır. Kalker Elazığ İli Kömürhan Taş Ocağı'ndan, bazalt Elazığ İli Harput Beton Taş Ocağı'ndan, Dere malzemesi ise Bingöl İli Genç-Murat Kum-Çakıl Ocağı'ndan temin edilmiştir.

2.2. Çalışmada Kullanılan Bitümler

Bağlayıcı olarak Batman Rafinerisi'nden temin edilen 50/70 ve 160/220 penetrasyonlu 2 tip bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

2.3. Çalışmada Kullanılan Aletler

Çalışma için temin edilen malzemeler çeşitli aletler kullanılarak deneylere hazırlanmış ve bu deneylerden sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan aletler, özellikleri ve kullanım amaçları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan aletler, özellikleri ve kullanım amaçları [52].

Alet	Özellik	Kullanım Amacı
Etüv	Sıcaklığı 150°C-200°C aralığında ± 3 °C duyarlılıkta değişmez olarak tutabilen araçtır.	Agrega, bitüm, kalıplar ve diğer gerekli olan malzemeleri istenilen karışım ve kullanma sıcaklığına kadar ısıtmak için kullanılır.
Numune sıkıştırma kalıpları	101mm çapında 76mm yüksekliğinde silindirik bir kalıp ve taban plakası ilave edilmiş silindirik bir kalıptan oluşur.	Karışım numunelerinin dökülüp sıkıştırma işleminin yapıldığı kalıplardır. Bu kalıplar karışım dökülmeden önce ısıtılıp yağlanmalıdır.
Otomatik sıkıştırma tokmağı	Sıkıştırma yüzeyi düz, silindir bir başlığı olan 4536 gr'lık bir kütlenin, 457mm yükseklikten düşmesine imkan veren sıkıştırma işlemini istenilen darbe sayısına göre otomatik olarak yapar.	Kalıplara dökülen karışım numunelerini sıkıştırma işleminde kullanılır.
Numune çıkarıcısı	Çapı 98 $\pm$ 2 mm kalınlığında en az 13 mm olan bir diskittir.	Sıkıştırılmış numuneleri kalıplarından çıkarmaya yaramaktadır. Numuneler kalıptan rahat çıkarılması için kalıplar numune çıkarıcısına iyice oturtulmalıdır.
Su banyosu	İçinde bulunan suyu 60 °C $\pm$ 1 °C sabit sıcaklıkta tutabilen en az 150 mm derinliğinde ve banyo tabanından 50 mm yüksekliğinde bir raflı bulunan termostatik kontrollü bir araçtır.	Numunelerin deneysel çalışmalar için gerekli olan işlemlerde belirli sürede içerisinde bekletilmesi için kullanılır.
Marshall stabilite aleti	Briketin alete yerleştirilmesi sonrasında otomatik olarak ölçüm yapar.	Hazırlanmış olan briketlerin stabilite ve akma değerlerini bulmaya yaramaktadır.
Diğer aletler	Deneysel çalışmalar öncesinde temin edilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan gerekli malzemelerdir.	Agrega ve bitüm özgül ağırlık bulmada gerekli piknometreler, Agregada gradasyonunu belirlemede elek serisi, agrega ve bitümü karıştırmak için kullanılan kürek ve bitüm kovası, sıkıştırmak için spatula, kalıp ve numunelerin birbirine yapışmasını önleyen pelür kağıt, gerekli sıcaklık ölçümleri için termometre, malzemeleri tartmaya yarayan hassas terazi, sıcak kalıpları ve numuneleri tutmak için gerekli olan eldiven vb. gereçlerden oluşur.

2.4. Metot

Bu çalışmada, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013 Kısım 407 Asfalt Betonlu Binder ve Aşınma Tabakaları başlığı adı altında belirtilen kriterler ve standartlar göz önüne alınmıştır.

Bitümlü sıcak karışım tasarım yöntemi olarak şartnamede belirtilen Marshall Tasarım Yöntemi seçilmiştir. Deneylerde kullanılacak numunelerin hazırlanmasında ve saklanmasında, deneylerin yapılmasında gerekli olan elek serisi, hassas terazi, su banyosu, etüv, termometre, karıştırıcı, Marshall deney kalıpları, Marshall sıkıştırma tokmağı, Marshall deney aleti için Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü laboratuvarı kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda karışımların agrega gradasyonunu belirlemek için KTŞ (2013)'te belirtilen Tablo 2.2'de gösterilen Binder Tabakası için gradasyon limitleri kullanılmıştır. Yine bitümlü sıcak karışım dizaynı için KTŞ (2013)'te belirtilen Tablo 2.3'te gösterilen Binder Tabakası asfalt betonu dizayn kriterleri ve Tablo 2.4'te gösterilen karışım tolerans sınırları dikkate alınmıştır.

Tablo 2.2. Binder Tabakası gradasyon limitleri [53].

Elek Boyu mm (in, No)	% Geçen
25 (1")	100
19 (3/4")	80-100
12,5 (1/2")	58-80
9,5 (3/8")	48-70
4,75 (No.4)	30-52
2,00 (No.10)	20-40
0,425 (No.40)	8-22
0,180 (No.80)	5-14
0,075 (No.200)	2-7

Tablo 2.3. Asfalt betonu dizayn kriterleri [53].

Özellikler	Binder		Deney Standardı
	Min.	Maks.	
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75		TS EN 12697-30
Marshall stabilitesi, kg	750	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	TS EN 12697-8
Asfalt dolu boşluk, %	60	75	TS EN 12697-8
Agregalar arası boşluk (VMA), %	13	15	TS EN 12697-8
Akma, mm 10 ⁻² in.	2 (8)	4 (16)	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm oranı	-	1,4	
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	TS EN 12697-1

Tablo 2.4. Karışım tolerans sınırları [53].

Malzeme	Toleranslar
4,75 mm (No.4) ve daha büyük eleklerden geçenler	± % 4
2,00 mm (No.10) - 0,180 mm (No.80) eleklerden geçenler	± % 3
0,075 mm (No.200) eleği geçen	± % 2
Bitümlü bağlayıcı	± % 0,2

Deneyisel çalışmalarda Marshall Tasarım Yöntemi için hazırlanan bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan malzemelerin türü ve sonuçların sunulması için karışımların kısa adlandırılması Tablo 2.5’te gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Marshall Tasarım Yönteminde kullanılan malzemelerin türü ve adlandırılması

Agrega Türü	Bitümlü Bağlayıcı Türü	Adlandırma
Kalker	50/70 penetrasyonlu bitüm	K 1
Kalker	160/220 penetrasyonlu bitüm	K 2
Bazalt	50/70 penetrasyonlu bitüm	B 1
Bazalt	160/220 penetrasyonlu bitüm	B 2
Dere malzemesi	50/70 penetrasyonlu bitüm	D 1
Dere malzemesi	160/220 penetrasyonlu bitüm	D 2
Kalker + Dere malzemesi (Bir briket için agrega ağırlığındaki (1150 gr) karışım oranları % 50’e % 50’dir.)	50/70 penetrasyonlu bitüm	KD 1
Kalker + Dere malzemesi (Bir briket için agrega ağırlığındaki (1150 gr) karışım oranları % 50’e % 50’dir.)	160/220 penetrasyonlu bitüm	KD 2

2.4.1. Agregaların Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranları Tayini

Agregalar boşluklu yapıya sahip malzemelerdir. Agregaların özgül ağırlıkları, gerçek birim hacmine karşılık gelen ağırlığı olarak tanımlanır [54].

Su emme oranı, agreganın yapısında bulunan ve sıvı maddeler ile dolabilecek boşlukları ifade etmektedir. Doygun kuru yüzey durumundaki agrega numunesinin, kuru ağırlığına oranı su emme oranını vermektedir [22]. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri kaba agregaya için ASTM C 127, ince agregaya ve filler malzemeler için ASTM C 128 standartları kullanılarak yapılmıştır [55, 56].

Özgül ağırlıklar agregaların kökenleri hakkında bilgi verir ve Marshall karışım dizaynında kullanılır. Özgül ağırlık, agreganın uygunluğunu belirlemektedir. Düşük özgül ağırlık sağlam olmayan malzemeyi, yüksek özgül ağırlık ise kaliteli asfalta uygun agregayı tanımlar. Özgül ağırlığın düşük olması agreganın boşluklu ve zayıf olduğunu gösterir. Asfaltda kullanılacak agreganın özgül ağırlığının 2,4-2,8 arasında olması istenmektedir [1].

2.4.1.1. Kaba Agreganın Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini

Deney, kaba agregaların (4,75 mm (No:4) elek üzerinde kalan) özgöl ağırlık ve su emme oranını tayin etmek amacıyla ASTM C 127 standardı kullanılarak yapılmıştır.

- Numune hazırlamada agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm elek üzeri agregalardan oluşan deney numunelerini 0,1 hassasiyetle tartabilecek bir terazi yardımıyla 2 kg numune tartılır ve iki adet deney numunesi hazırlanır. Deney sonunda verilerin ortalaması alınır.
- Tartılan numuneler yıkanır ve agreganın üzerini geçecek miktarda su ilave edilir. Numuneler 24 saat tepside su içinde bekletilir.
- 24 saat sonunda numuneler sudan çıkarılır. Havlu veya peçete yardımıyla yüzey kuru suya doymun hale getirilir. Bu halde tartım yapılır ve yüzey kuru suya doymun agrega ağırlığı elde edilir. 2. numune içinde aynı işlemler yapılır.
- Numuneler tel sepet yardımıyla agrega numuneleri üstten 5 cm içerisinde kalacak şekilde su ($25 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa ve $977 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip) dolu kovaya daldırılır. Sudaki ağırlığı belirlenir. Agreganın daneleri arasında hava boşluğu kalmaması için sepet birkaç defa sarsılabilir.
- Tartım sonrası tel sepetten çıkarılıp bir tepsiye konan agrega $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulur. Sabit kütleye ulaşan agrega 1-3 saat soğumaya bırakılır. Kuru numune tartılır ve tartım kaydedilir. 2. numune içinde aynı işlemler yapılır.

Deneysel çalışmada kullanılan kalker, bazalt ve dere malzemesi için ayrı ayrı yapılan kaba agrega hacim özgöl ağırlık, zahiri özgöl ağırlık ve su emme yüzdeleri Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim özgöl ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{A}{B-C} \quad (2.1)$$

$$\text{Zahiri özgöl ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{A}{A-C} \quad (2.2)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (2.3)$$

Burada;

A = Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr

B = Doymun yüzey kuru malzemenin ağırlığı, gr

C = Malzemenin sudaki ağırlığı, gr [57].

2.4.1.2. İnce Agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini

Deney, ince agregaların (4,75 mm (No:4) ile 0,075 mm (No:200) elekler arasında kalan) özgül ağırlık ve su emme oranını tayin etmek amacıyla ASTM C 128 standardı kullanılarak yapılmıştır.

- Numune hazırlamada agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm-0,075 mm arası agregalardan oluşan deney numunelerini 0,1 hassasiyetle tartabilecek bir terazi yardımıyla 1 kg numune tartılır ve iki adet deney numunesi hazırlanır. Deney sonunda verilerin ortalaması alınır.
- Tartılan numuneler yıkanır ve agreganın üzerini geçecek miktarda su ilave edilir. Numuneler 24 saat tepside su içinde bekletilir.
- 24 saat sonunda tepside fazla su dökülür ve numuneler sudan çıkarılır. Sıcak hava kaynağı yardımıyla yüzey kuru suya doymuş hale getirilir. Bu halde tartım yapılır ve yüzey kuru suya doymuş agrega ağırlığı elde edilir. 2. numune içinde aynı işlemler yapılır. Yüzey kuru suya doymuş hal koni metodu ile belirlenir. Metal koni kalıp içerisine numuneler her seferinde 25 vuruş yapılarak 3 tabaka halinde sıkıştırılır. Sıkışan numuneler koninin ters çevrilmesi ile tepsiye konulur. İnce kesitli mala ile agrega yığını ikiye bölünür. Numune hala kendini tutuyor ise kurutmaya devam edilir. Numune yığını kendini bırakıyorsa yüzey kuru suya doymuş hal sağlanmış demektir.
- İki adet piknometrenin boş ağırlıkları belirlenir. Daha sonra piknometrelerin çizgilerine kadar saf su eklenir, ağırlıkları belirlenir. Saf suları boşaltılır ve piknometreler kurutulur. Numuneler piknometreye yerleştirilir ve tartılır. Numuneler üzerine su ilave edilir ve boşluk kalmaması için sarsılır. Piknometreler ağzında biriken köpükler alınır ve tekrar tartılır. Numuneler piknometrelerden tepsilere çıkarılır.
- $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulur. Sabit kütleyle ulaşan agrega 1-3 saat soğumaya bırakılır. Kuru numuneler tartılır ve tartımlar kaydedilir.

Deneysel çalışmada kullanılan kalker, bazalt ve dere malzemesi için ayrı ayrı yapılan ince agrega hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri Eşitlik 2.4, Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim özgül ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{A}{B+S-C} \quad (2.4)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{A}{B+A-C} \quad (2.5)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{S-A}{A} \times 100 \quad (2.6)$$

Burada;

A = Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı, gr

C = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu ve numune konmuş piknometre ağırlığı, gr

S = Doygun yüzey kuru malzemenin ağırlığı, gr [57].

2.4.1.3. Mineral Filler Özgül Ağırlık Tayini

Deney, filler agregaların (0,075 mm (No:200) elekten geçen) özgül ağırlık tayin etmek amacıyla ASTM C 128 standardı kullanılarak yapılmıştır. Filler agregası için sadece zahiri (görünen) özgül ağırlık hesaplanır. Zahiri özgül ağırlık; belirli bir sıcaklıktaki agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır.

- Numune hazırlamada agregası dane dağılımını temsil edecek şekilde 0,075 mm elekten geçen agregalardan oluşan deney numunelerini 0,1 hassasiyetle tartabilecek bir terazi yardımıyla 100 gr numune tartılır ve iki adet deney numunesi hazırlanır. Deney sonunda verilerin ortalaması alınır.
- Piknometre boş ağırlığı belirlenir.
- Piknometre + su ağırlığı belirlenir. Piknometreler kurutulur. Numuneler piknometrelere yerleştirilir.
- Piknometre + numune ağırlığı belirlenir. Numuneler üzerine su ilave edilir ve boşluk kalmaması için sarsılır. Piknometreler ağzında biriken köpükler alınır ve tekrar tartılır.
- Piknometre + su ağırlığı + numune ağırlığı belirlenir. Numuneler piknometrelerden tepsilere çıkarılır. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulur. Sabit kütleye ulaşan agregası 1-3 saat soğumaya bırakılır.
- Kuru numune ağırlığı belirlenir.

Deneyisel çalışmada kullanılan kalker, bazalt ve dere malzemesi için ayrı ayrı yapılan filler zahiri özgül ağırlık hesaplamaları Eşitlik 2.7 yardımıyla bulunmaktadır.

$$\text{Özgöl ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{A}{A+B-C} \quad (2.7)$$

Burada;

A = Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı, gr

C = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu ve numune konmuş piknometre ağırlığı, gr [57].

2.4.2. Bitüm Özgöl Ağırlık Tayini

Bitümlü sıcak karışım yapımında kullanılacak olan Batman Petrol Rafinerisi'nden temin edilmiş 50/70 ve 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcılar için özgöl ağırlık deneyi yapılmıştır.

Özgöl ağırlık deneyi, belirli hacimdeki bitüm ağırlığının aynı hacimdeki su ağırlığına oranının bulunmasını amaçlamaktadır. Bu deneyde TS EN 15326 standardı kullanılmıştır [58].

Deney 25 °C ortamda piknometre, distile su ve bitüm kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde kullanılacak piknometre temiz ve kuru halde tartılmıştır. Daha sonra piknometre kalibrasyon çizgisine kadar distile su ile doldurulmuş ve tartılmıştır. Su ile tartımı yapılan piknometre boşaltılmış, kurutulmuş ve kalibrasyon çizgisinin üçte ikisine kadar bitüm ile doldurularak tartılmıştır. Piknometre içerisine bitüm yerleştirilirken bitüm içerisinde hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmelidir. Bitüm konulmuş piknometre, kalibrasyon çizgisine kadar distile su ile doldurulmuş ve tartılarak toplam ağırlık kayıt edilmiştir. Bitümlerin özgöl ağırlıkları Eşitlik 2.8 yardımıyla hesaplanmıştır [35, 58].

$$\text{Özgöl ağırlık } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{C-A}{B-A-(D-C)} \quad (2.8)$$

Burada;

A = Piknometre boş ağırlığı, gr

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı, gr

C = Kalibrasyon çizgisinin 2/3'üne kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr

D = Piknometre, bitüm ve su ağırlığı, gr [34].

2.5. Marshall Tasarım Yöntemi

BSK'ların dizayn edilmesinde Marshall metodu olarak bilinen Marshall stabilite ve akma deneyi kullanılmaktadır. Bu metot, "American Society for Testing and Materials" tarafından standart haline getirilmiş ve metot ASTM D-1559'da verilmiştir. Ülkemizde de bu deney TS EN 12967-34 standardına göre yapılmaktadır [59, 60]. Bu standartta stabilite; yükleme sonucu meydana gelen deformasyona karşı maksimum dayanım miktarı olarak, akma ise yükleme esnasında maksimum yüke ulaşıldığı andaki numunede meydana gelen deformasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır [57].

Metot, sıcak karışımların laboratuvar dizaynı ve sıcak karışım asfalt kaplamalarının uygulamadaki kontrolleri için kullanılır [61]. Bu çalışmada da karışım dizayn metodu olarak Marshall Metodu kullanılmıştır.

Marshall metodu ile hazırlanan sıcak karışım dizaynı aşağıdaki işlem sırasına göre yapılmaktadır.

- Agreganın granülometrisinin belirlenmesi
- Karışımın agreganın özgül ağırlıklarının belirlenmesi
- Agreganın ve bitüm miktarının belirlenmesi
- Briketlerin hazırlanması, ilgili hesaplamalar ve boşluk analizleri
- Stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarının belirlenmesi [34].

2.5.1. Agreganın Granülometrisinin Belirlenmesi

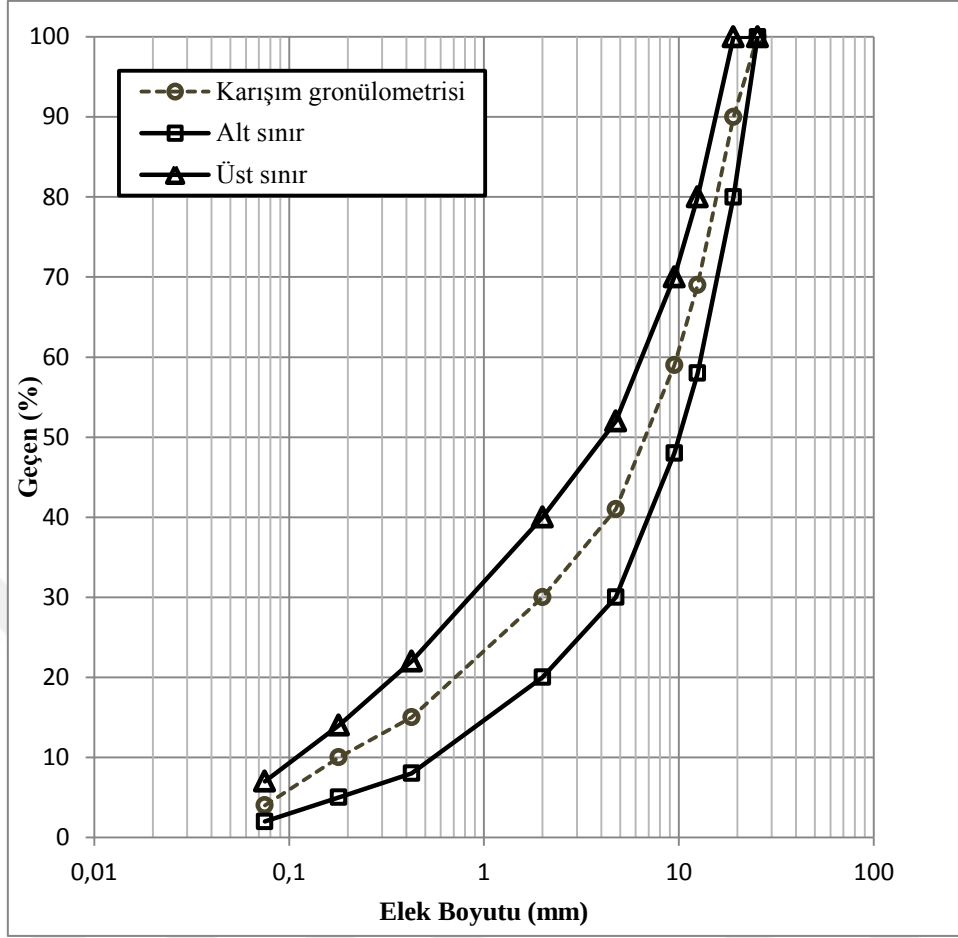
Bir agreganın yığını içerisindeki tanelerin büyüklüklerine göre gösterdikleri tane dağılımı oranına gradasyon denilmektedir. Gradasyon eğrisi, yığın içerisindeki agreganın tanelerin boyutlarına göre dağılımını gösteren eğridir [62]. Çalışmada kullanılan agregalar için asfalt betonu karışım numunelerinin hazırlanmasında KTŞ (2013)'te belirtilen Binder Tabakası granülometri sınırları arasında kalan agreganın karışımı kullanılmıştır. Taşocaklarından alınan agregalar öngörülen granülometri için elemeye tabi tutularak bir numune için gerekli malzeme miktarlarına ilişkin her bir elek üzerinde kalan miktar ve şartname sınır değerleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Bir numune için kullanılacak bir çeşit agreganın tüm elek aralığı dahil toplam ağırlığı 1150 gr olarak alınmıştır.

Ülkemizde karayolu kırma taşlarında 1", 3/4", 1/2", 3/8", No:4, No:10, No:40, No:80, No:200 standart elekleri kullanılır. Elekler büyükten küçüğe doğru sıralanır ve malzeme en üst elekten başlanarak elenir. Elek üstü kalan malzemeler yığışimli olarak 0,1 gr hassasiyetinde bir terazi ile tartılır [1]. Daha sonra yüzde geçenler, toplam yüzde kalanlar ve belli boyutlardaki yüzdelere toplam ağırlığın % 0,1'i yakınlığında hesaplanarak Şekil 2.1'deki gibi grafikte eğrilerle gösterilir.

Çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde kullanılan karışım numuneleri Şekil 2.1'de verilen bu yoğun agrega granülometrisi kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 2.6. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları

Elek boyutu		Şartname sınırları toplam geçen	Karışım granülometrisi toplam geçen	Elek üzerinde kalan	Bir numune için kullanılan miktar
Inch	Mm	%	%	%	Gr
(1")	25	100	100	0	0
(3/4")	19	80-100	90	10	115,0
(1/2")	12,5	58-80	69	21	241,5
(3/8")	9,5	48-70	59	10	115,0
No:4	4,75	30-52	41	18	207,0
No:10	2,00	20-40	30	11	126,5
No:40	0,425	8-22	15	15	172,5
No:80	0,180	5-14	10	5	57,5
No:200	0,075	2-7	4	6	69,0
Tava	-	-	0	4	46,0
Toplam				100	1150,0



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan agregat gronölometrisi

2.5.2. Karışımın Agregat Özgül Ağırlıklarının Belirlenmesi

Deneysel çalışmada agregat karışımı, farklı özgül ağırlıklara sahip kaba agregat, ince agregat ve mineral fillerden oluşmaktadır. Toplam agreganın hacim veya zahiri özgül ağırlığı Eşitlik 2.9 veya Eşitlik 2.10 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$Gsb = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{Gkb} + \frac{\%İ}{Gib} + \frac{\%F}{Gfa}} \quad (2.9)$$

$$Gsa = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{Gka} + \frac{\%İ}{Gia} + \frac{\%F}{Gfa}} \quad (2.10)$$

Burada:

Gsb : Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)

Gsa : Agregat karışımının zahiri özgül ağırlığı (gr/cm^3)

$\%K, \%İ, \%F$: Agregaların ağırlıkça yüzdeleri (Kaba, İnce, Filler)

Gkb, Gib : Agregaların hacim özgül ağırlıkları (Kaba, İnce), (gr/cm^3)

Gka, Gia, Gfa : Agregaların zahiri özgül ağırlıkları (Kaba, İnce, Filler), (gr/cm^3) [34].

2.5.3. Agregaya ve Bitüm Miktarının Belirlenmesi

Marshall deney numuneleri (briketleri) için yaklaşık 1100-1300 gr agregaya ihtiyaç vardır. Briketler set halinde hazırlanır. Farklı bitüm yüzdelere sahip her set için en az 3, tercihen 5 briket hazırlanır [63]. Karışımdaki bitüm yüzdesi, agregaya ağırlığına göre bitüm yüzdesi ve karışım içindeki bitümün ağırlıkça yüzdesi olmak üzere iki şekilde belirlenebilir.

Agregaya Ağırlığına Göre Bitüm Yüzdesi (W_a): Hazırlanacak bir brikette, kullanılan agregaya ağırlığına göre ne kadar bitüm katılacağını ifade eder. Briketler, farklı bitüm yüzdelere sahip setler halinde hazırlanır.

Karışım İçindeki Bitümün Ağırlıkça Yüzdesi (W_b): normal bitüm yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin, 1100 gr kuru agregaya ile 66 gr bitüm karıştırılırsa, oluşan 1166 gramlık karışımda, $W_b = 66/(66+1100) = \% 5,66$ olur [34].

Bu çalışmada her numune için 1150 gr agregaya kullanılmıştır. Her bitüm oranı için 3 adet briket hazırlanmıştır. Çalışmada bitüm oranları % 4-6 arası % 0,5 oranda artırılarak 5 bitüm oranı kullanılmıştır.

2.5.4. Briketlerin Hazırlanması, İlgili Hesaplamalar ve Boşluk Analizleri

Marshall numuneleri (briketleri) aşağıda verilen işlem sırasına göre şartlara uygun olarak hazırlanır.

- Her bitüm yüzdesi için üçer numune hazırlanacağı düşünülerek, her bir numunede kullanılacak agregaya belirlenen granülometriye uygun olarak tartılarak hazırlanır. 1150 gramlık agregaya karışımları ayrı ayrı kaplara konarak 165 °C lik etüvde 24 saat bekletilir.
- Karışımda kullanılacak olan asfalt çimentosu da etüvde 165 °C'ye kadar ısıtılır.
- Deneyde kullanılacak olan spatula, briket kapları, karıştırma kabı, kürek vb. aletler de 165 °C'lik etüvde ısıtılır.
- 160 °C deki agregaya yine aynı sıcaklıktaki karıştırma kabına boşaltılır ve karıştırılır. Bu şekilde hazırlanan agregaya içerisine bir çukur açılır ve agregaya ağırlığına göre karışımın içerisine konulması gereken asfalt miktarı açılan çukura ilave edilir.
- Asfalt çimentosunun agregaya içerisinde uniform bir şekilde dağılmasını sağlamak maksadıyla karıştırma işlemi mekanik bir karıştırıcı ile ya da kürek kullanarak elle mümkün olduğu kadar çabuk ve iyi bir şekilde yapılması gerekir (Şekil 2.2 (a)).

- Numunelerin otomatik tokmakta sıkıştırılması için etüvden alınan kalıpların içleri hafif yağlanarak karıştırılmış numuneler bu kalıpların içine kademeli şekilde her kademede şişlenerek yerleştirilir. Kalıp içerisinde alt ve üst yüzeye pelür kağıt konulmalıdır. Kalıplar içerisine konulan numuneler otomatik sıkıştırma tokmağına yerleştirilir ve cihaz çalıştırılır. Numunelerin sıkıştırılmasında cihaz her iki yüzüne 75 darbe uygulayacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu işlem olduğu kadar çabuk yapılmalıdır (Şekil 2.2 (b)).
- Sıkıştırılmış numuneler numaralandırılır ve kalıptan çıkarılırken hiç deformasyon meydana gelmeyecek duruma gelene kadar kalıpla birlikte soğumaya bırakılır (Şekil 2.3).
- Numuneler soğuduktan sonra numune çıkarıcısı yardımıyla kalıptan çıkarılır (Şekil 2.4) ve düz bir yüzey üzerine konulur ve bir gece soğumaya bırakılır [34].



(a)



(b)

Şekil 2.2. Numune hazırlanmasında (a) Karıştırma işlemi (b) Otomatik tokmak yardımıyla sıkıştırılma işlemi



Şekil 2.3. Numunelerin kalıplardan çıkarılmadan önce etiketlenmesi ve bekletilmesi



Şekil 2.4. Numunelerin kalıptan numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılması

Briketlerin yüksekliklerinin belirlenmesinde 3'lü olarak döküm yaptığımız her briketin 3 farklı yerinden bir kumpas yardımıyla okuma yapılır ve kaydedilir (Şekil 2.5). Standart briket yüksekliği 63,5 mm'dir. Mukavemet değerleri bu yüksekliğe göre değerlendirilir ve standart briket yüksekliğine karşılık gelen katsayı 1'dir. Yüksekliğin, standart briket yüksekliğinden büyük olduğu durumda katsayısı azalır, standart briket yüksekliğinden küçük olduğu durumda katsayısı artar. Briketlerin ölçülen stabiliteyi bu katsayılarla çarpılarak standart briket yüksekliğine göre düzeltilmiş stabilite değerleri bulunur. Bu stabilite faktörleri Tablo 2.7'de verilmektedir.

Briketlerin hacimleri doygun yüzey-kuru ağırlıklarından sudaki ağırlıklarının çıkarılmalarıyla elde edilmektedir. Briketlerin hacimlerinin belirlenmesinde briketler ilk

olarak havada ağırlıkları tartılır ve kaydedilir (Şekil 2.6 (a)). Sonra numuneler su havuzunun içerisine konularak su emmeleri iyice tamamlana kadar beklenir. Briketlerin sudaki ağırlıkları kaydedilir (Şekil 2.6 (b)). Numuneler sudan çıkarılıp yüzeyleri serbest suyu alacak şekilde hemen havlu vb. yardımıyla dikkatlice kurularak doymun yüzey-kuru ağırlıkları belirlenir (Şekil 2.6 (c)). Eşitlik 2.11 yardımıyla briket hacimleri hesaplanır.

$$V = B - C \quad (2.11)$$

Burada:

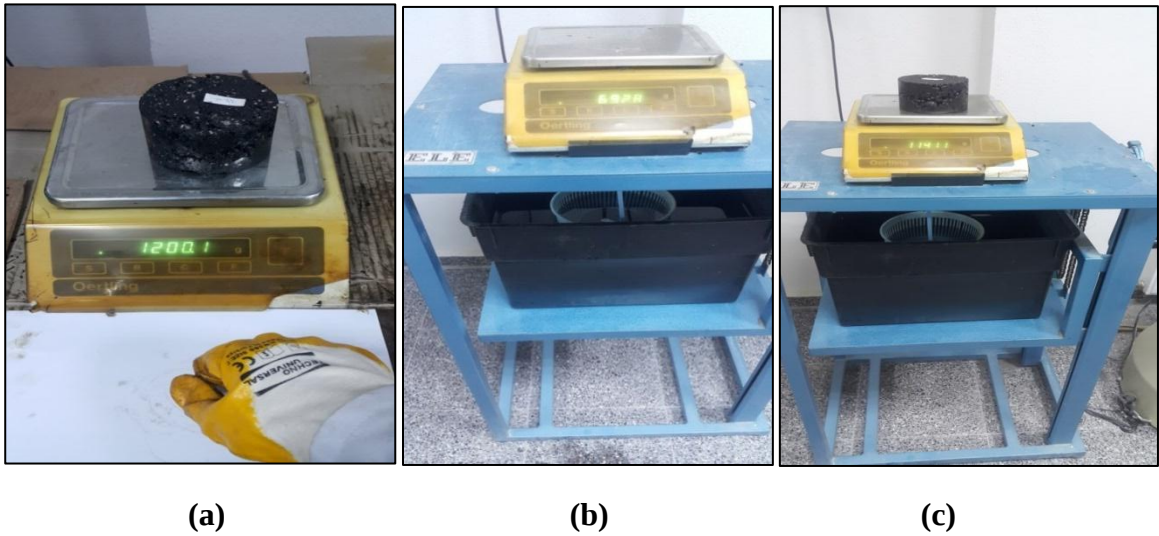
V : Briketin hacmi (cm^3)

B : Briketin doymun yüzey- kuru ağırlığı (gr)

C : Briketin sudaki ağırlığı (gr) [34].



Şekil 2.5. Briket yüksekliklerinin belirlenmesi



Şekil 2.6. Numunelerin (a) havadaki, (b) sudaki, (c) doymun yüzey kuru haldeki ağırlıklarının belirlenmesi

Tablo 2.7. Marshall stabilite faktörleri [61].

Numune (mm)		Numune (mm)		Numune (mm)		Numune (mm)		Numune (mm)	
Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör
50,0	1,470	55,3	1,256	60,6	1,079	65,9	0,943	71,2	0,834
50,1	1,467	55,4	1,253	60,7	1,076	66,0	0,940	71,3	0,832
50,2	1,463	55,5	1,250	60,8	1,073	66,1	0,938	71,4	0,830
50,3	1,460	55,6	1,247	60,9	1,070	66,2	0,936	71,5	0,829
50,4	1,456	55,7	1,243	61,0	1,067	66,3	0,934	71,6	0,828
50,5	1,453	55,8	1,239	61,1	1,064	66,4	0,932	71,7	0,826
50,6	1,449	55,9	1,235	61,2	1,062	66,5	0,930	71,8	0,825
50,7	1,446	56,0	1,231	61,3	1,059	66,6	0,927	71,9	0,824
50,8	1,442	56,1	1,228	61,4	1,056	66,7	0,925	72,0	0,822
50,9	1,439	56,2	1,224	61,5	1,053	66,8	0,922	72,1	0,821
51,0	1,435	56,3	1,220	61,6	1,050	66,9	0,920	72,2	0,820
51,1	1,432	56,4	1,216	61,7	1,047	67,0	0,918	72,3	0,818
51,2	1,428	56,5	1,214	61,8	1,044	67,1	0,915	72,4	0,817
51,3	1,425	56,6	1,210	61,9	1,040	67,2	0,913	72,5	0,815
51,4	1,421	56,7	1,206	62,0	1,038	67,3	0,911	72,6	0,814
51,5	1,418	56,8	1,202	62,1	1,036	67,4	0,908	72,7	0,812
51,6	1,414	56,9	1,198	62,2	1,033	67,5	0,906	72,8	0,811
51,7	1,411	57,0	1,194	62,3	1,031	67,6	0,904	72,9	0,810
51,8	1,407	57,1	1,190	62,4	1,028	67,7	0,901	73,0	0,809
51,9	1,404	57,2	1,187	62,5	1,026	67,8	0,899	73,1	0,808
52,0	4,400	57,3	1,184	62,6	1,023	67,9	0,897	73,2	0,806
52,1	1,397	57,4	1,181	62,7	1,021	68,0	0,894	73,3	0,804
52,2	1,393	57,5	1,178	62,8	1,018	68,1	0,892	73,4	0,802
52,3	1,390	57,6	1,175	62,9	1,016	68,2	0,890	73,5	0,800
52,4	1,382	57,7	1,172	63,0	1,013	68,3	0,888	73,6	0,799
52,5	1,375	57,8	1,169	63,1	1,011	68,4	0,886	73,7	0,797
52,6	1,368	57,9	1,164	63,2	1,008	68,5	0,885	73,8	0,795
52,7	1,359	58,0	1,161	63,3	1,006	68,6	0,883	73,9	0,794
52,8	1,351	58,1	1,158	63,4	1,003	68,7	0,881	74,0	0,792
52,9	1,344	58,2	1,155	63,5	1,000	68,8	0,879	74,1	0,790
53,0	1,337	58,3	1,152	63,6	0,998	68,9	0,877	74,2	0,788
53,1	1,328	58,4	1,149	63,7	0,995	69,0	0,875	74,3	0,786
53,2	1,320	58,5	1,146	63,8	0,992	69,1	0,874	74,4	0,784
53,3	1,317	58,6	1,143	63,9	0,990	69,2	0,872	74,5	0,782
53,4	1,314	58,7	1,140	64,0	0,988	69,3	0,870	74,6	0,780
53,5	1,311	58,8	1,137	64,1	0,985	69,4	0,868	74,7	0,779
53,6	1,308	58,9	1,133	64,2	0,982	69,5	0,866	74,8	0,777
53,7	1,305	59,0	1,130	64,3	0,980	69,6	0,864	74,9	0,776
53,8	1,302	59,1	1,127	64,4	0,978	69,7	0,862	75,0	0,775
53,9	1,299	59,2	1,124	64,5	0,975	69,8	0,860	75,1	0,773
54,0	1,296	59,3	1,120	64,6	0,972	69,9	0,858	75,2	0,772
54,1	1,293	59,4	1,117	64,7	0,970	70,0	0,856	75,3	0,771
54,2	1,290	59,5	1,114	64,8	0,967	70,1	0,854	75,4	0,770
54,3	1,286	59,6	1,110	64,9	0,965	70,2	0,852	75,5	0,769
54,4	1,283	59,7	1,107	65,0	0,962	70,3	0,850	75,6	0,767
54,5	1,280	59,8	1,104	65,1	0,960	70,4	0,849	75,7	0,766
54,6	1,277	59,9	1,100	65,2	0,957	70,5	0,847	75,8	0,765
54,7	1,274	60,0	1,097	65,3	0,955	70,6	0,845	75,9	0,764
54,8	1,271	60,1	1,094	65,4	0,953	70,7	0,843	76,0	0,762
54,9	1,268	60,2	1,090	65,5	0,951	70,8	0,841	76,1	0,761
55,0	1,265	60,3	1,088	65,6	0,949	70,9	0,839	76,2	0,760
55,1	1,262	60,4	1,085	65,7	0,947	71,0	0,837	76,3	0,759
55,2	1,259	60,5	1,082	65,8	0,945	71,1	0,836	76,4	0,758

Her briket için hacim özgül ağırlık, maksimum teorik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk hava boşluğu ve asfalt dolu boşluk değerleri Eşitlik 2.12, Eşitlik 2.13, Eşitlik 2.14, Eşitlik 2.15 ve Eşitlik 2.16 formülleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

Briketin Hacim Özgül Ağırlığı (Dp): Briketin ağırlığının hacmine oranıdır.

$$Dp = \frac{A}{V} \quad (2.12)$$

Burada:

Dp: Briketin hacim özgül ağırlığı (gr/cm³)

A: Briketin havadaki ağırlığı (gr)

V: Briketin hacmi (cm³)

Aynı briket grubu içinde bulunan numunelerin hacim özgül ağırlıkları arasındaki fark 0.02 den fazla olmamalıdır. Olması halinde numune atıl olur ve yeniden yapılması gerekir [34]. 3'lü döküm yaptığımız her grup içindeki briketlerin tek tek birim hacim ağırlık değerleri bulunur, her seride bulunan birim hacim ağırlıklar toplanıp 3 e bölünerek ortalamaları alınır ve bundan sonraki hesaplarda kullanılacak *Dport*'lar bulunur.

Briketin Maksimum Teorik Özgül Ağırlığı (DT): Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığıdır.

$$DT = \frac{100}{\frac{100}{Gef} + \frac{Wb}{Gb}} \quad (2.13)$$

DT: Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (gr/cm³)

Wb: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)

Gef: Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm³)

Gb: Bitümün özgül ağırlığı (gr/cm³) [34].

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA): Efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agrega daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanır.

$$VMA = 100 - \frac{Dport}{Gsb} \times \frac{100}{100 + Wa} \times 100 \quad (2.14)$$

Burada:

VMA: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

Dport: Briketlerin hacim özgül ağırlıklarının ortalamaları (gr/cm³)

Gsb: Agregalar karışımının hacim özgül ağırlığı (gr/cm³)

Wa: Agregalar ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%) [34].

Hava Boşluğu % (Vh) ve Asfaltla Dolu Boşluk % (Vf): Sıkıştırılmış kaplama karışımı içinde hava boşluğu, kaplanmış agrega daneleri arasındaki küçük hava boşluklarıdır. Asfaltla dolu hava boşluk briketteki asfaltla dolu boşlukların yüzdesidir.

$$Vh = \frac{DT - D_{port}}{DT} \times 100 \quad (2.15)$$

$$Vf = \frac{VMA - Vh}{VMA} \times 100 \quad (2.16)$$

Burada:

Vh : Toplam hacim yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)

Vf: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)

DT: Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (gr/cm³)

Dport: Briketlerin hacim özgül ağırlıklarının ortalamaları (gr/cm³) [34].

2.5.5. Stabilite ve Akma Değerlerinin Belirlenmesi

Briketler üzerinde stabilite deneyi uygulanmadan önce numuneler yaklaşık 40 dakika 60°C'lik su banyosunda bekletilir. Sudun çıkartılan numuneye yaklaşık 30 sn içinde bezle suyu alınıp stabilite aletinin kırma kafasının içine yerleştirilir ve numuneye yük uygulanmaya başlanır. Uygulanan yük sabit bir deformasyon hızıyla kırılma anındaki yük değerine kadar devam eder. Brikette kırılma meydana geldiği andaki yük miktarı (kg) ve akma miktarı (inch) kaydedilir (Şekil 2.7). Her briket için aynı işlemler tekrarlanır. Bu işlemlerin oldukça hızlı olması gerekmektedir. Su banyosundan ilk alınan numune ile son alınan numune arasında zaman farkı fazla olması, sonradan alınan numunelerin 60°C deki su içinde daha fazla kalması demektir. Bu durumda numuneler için eşit şartlar oluşmaz. Bunu önlemek için numuneler su banyosuna yaklaşık 30 sn aralıklarla koyulabilir [34].



Şekil 2.7. Su banyosundan çıkarılan numunelerin Marshall stabilite aletinde kırılması

Marshall stabilite değerlerini ifade eden yük miktarı, Tablo 2.7’de verilen düzeltme faktörleri ile çarpılarak her bir briket için düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanır.

2.5.6. Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi

Briketlerin hacim özgül ağırlık, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra, $D_p - W_a$, $Stabilite - W_a$, $V_h - W_a$, $V_f - W_a$, $Akma - W_a$, $VMA - W_a$ grafikleri çizilir. İlk dört grafikten elde edilen bitüm yüzdeleri değerlerinin ortalaması alınarak, dizaynın optimum bitüm değeri bulunur [34].

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Çalışmada Kullanılan Agregalara ve Bitümlere Uygulanan Deneylerin Sonuçları

Çalışmada BSK numuneleri hazırlamak için kalker, bazalt ve dere malzemesi olarak 3 tip agreg a çeşidi kullanılmış olup agregalar üzerine uygulanan deneyler sonucunda hesaplanan özgül ağırlıkları ve su emme yüzdeleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Yine BSK numuneleri hazırlamak için 50/70 ve 160/220 penetrasyonlu 2 tip bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcılar üzerine uygulanan deneyler sonucunda hesaplanan özgül ağırlık değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan agregaların özgül ağırlıkları ve su emme yüzdeleri

Agrega Türü	Agrega Boyutu	Özellik	Deney Sonucu
Kalker	Kaba agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,653
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,714
		Su emme yüzdesi (%)	0,800
	İnce agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,671
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,731
		Su emme yüzdesi (%)	0,800
	Filler	Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,703
Bazalt	Kaba agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,864
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,908
		Su emme yüzdesi (%)	0,532
	İnce agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,810
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,875
		Su emme yüzdesi (%)	0,805
	Filler	Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,773
Dere malzemesi	Kaba agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,704
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,795
		Su emme yüzdesi (%)	0,640
	İnce agreg a	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,642
		Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,736
		Su emme yüzdesi (%)	0,720
	Filler	Zahiri Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,729

Tablo 3.2. Bitümlü bağlayıcıların özgül ağırlıkları

Bitümlü Bağlayıcı Türü	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
50/70 penetrasyonlu	1,036
160/220 penetrasyonlu	1,040

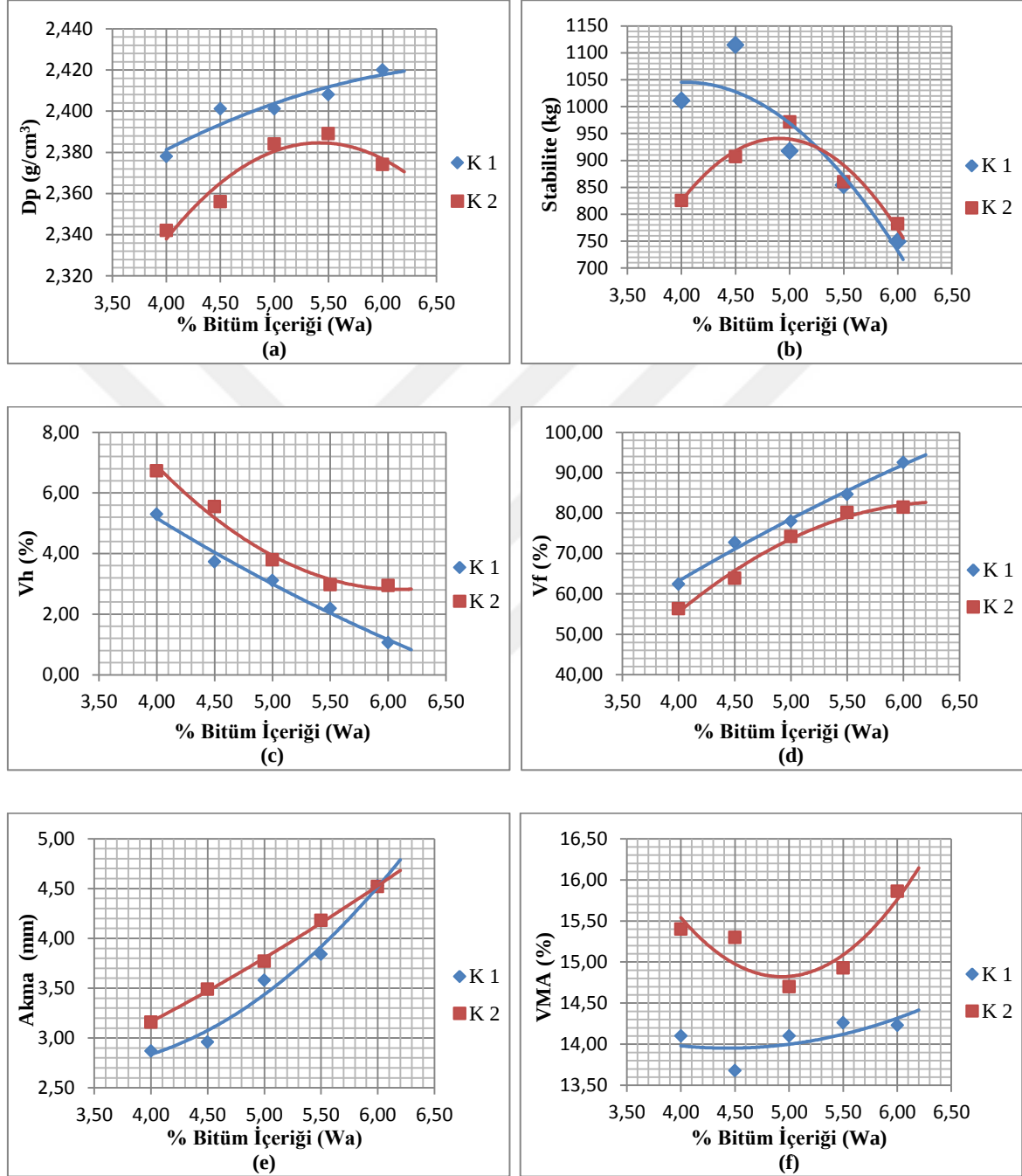
3.2. Karışımların Marshall Dizayn Sonuçları

Marshall dizaynı için değişik tipteki agrega ve bitümlerle BSK olarak hazırlanan numunelerin deneysel sonuçları hesaplanarak elde edilen veriler eklerde verilen Marshall deney föylerinde gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmalar sonucunda Marshall deney föylerindeki veriler yardımıyla gerekli grafikler oluşturularak karışımların optimum bitüm oranları ve optimum bitüm oranlarına karşılık gelen dizayn parametre değerleri elde edilmiştir. Yine oluşturulan bu grafikler yardımıyla karışımların deneysel sonuçları değerlendirilmiştir.

Karışım numunelerinde agrega türü olarak K'lar kalkerin, B'ler bazaltın, D'ler dere malzemesinin ve KD'ler kalker + dere malzemesinin kullanıldığını göstermektedir. Verilen numara olarak karışımlarda 1,50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcının kullanıldığını 2, 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcının kullanıldığını göstermektedir. Bunun neticesinde karışımlar ise K 1, K 2, B 1, B 2, D 1, D 2, KD 1 ve KD 2 olarak adlandırılmaktadır.

Optimum bitüm oranları, karışım numunelerinin % 4, % 4,5, % 5, % 5,5 ve % 6 bitüm oranlarına karşılık Dp, stabilite, Vh, Vf değerlerini içeren grafikler yardımıyla elde edilmiştir. Hesaplamalarda Dp - Wa grafiğinden maksimum özgül ağırlığı veren bitüm oranı, Stabilite - Wa grafiğinden Marshall stabilitesini maksimum yapan bitüm oranı, Vf - Wa grafiğinden KTŞ (2013)'de Binder Tabakası için (Tablo 2.3) öngörülen asfalt dolu boşluk yüzdesi sınırları arasında kalan % 67,5 asfaltla dolu boşluk yüzdesine denk gelen bitüm oranı, Vh - Wa grafiğinden yine şartname sınırları arasında kalan tam orta değerine karşılık gelen % 5 boşluk oranını sağlayan bitüm oranı değerleri bulunmuştur. Bu dört bitüm oranı yüzdelerinin ortalaması alınarak karışımların optimum bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Tekrar aynı grafiklerden bulunan optimum bitüm yüzdelerine karşılık dizayn parametre değerleri elde edilmiştir.

Ek Tablo.1 ve Ek Tablo.2’de verilen K 1 ve K 2 karışımlarına ait Marshall dizayn sonuçları yardımıyla elde edilen Dp - Wa, Stabilité - Wa, Vh - Wa, Vf - Wa, Akma - Wa, VMA - Wa grafikleri Şekil 3.1’de sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.1. K 1 ve K 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilité - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği

Şekil 3.1’de elde edilen grafikler yardımıyla agrega grubu kalker olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri Tablo 3.3’te ve bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.4’te verilmektedir.

Tablo 3.3. K 1 ve K 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri

Özellik	K 1	K 2
Özgül ağırlık, Dp (g/cm ³), (maks.)	6,00	5,50
Stabilite (kg),(maks.)	4,50	5,00
Boşluk, Vh (%), (% 5)	4,07	4,56
Asfalt dolu boşluk yüzdesi, Vf (%), (% 67,5)	4,27	4,60
Optimum bitüm yüzdesi (%)	4,71	4,92

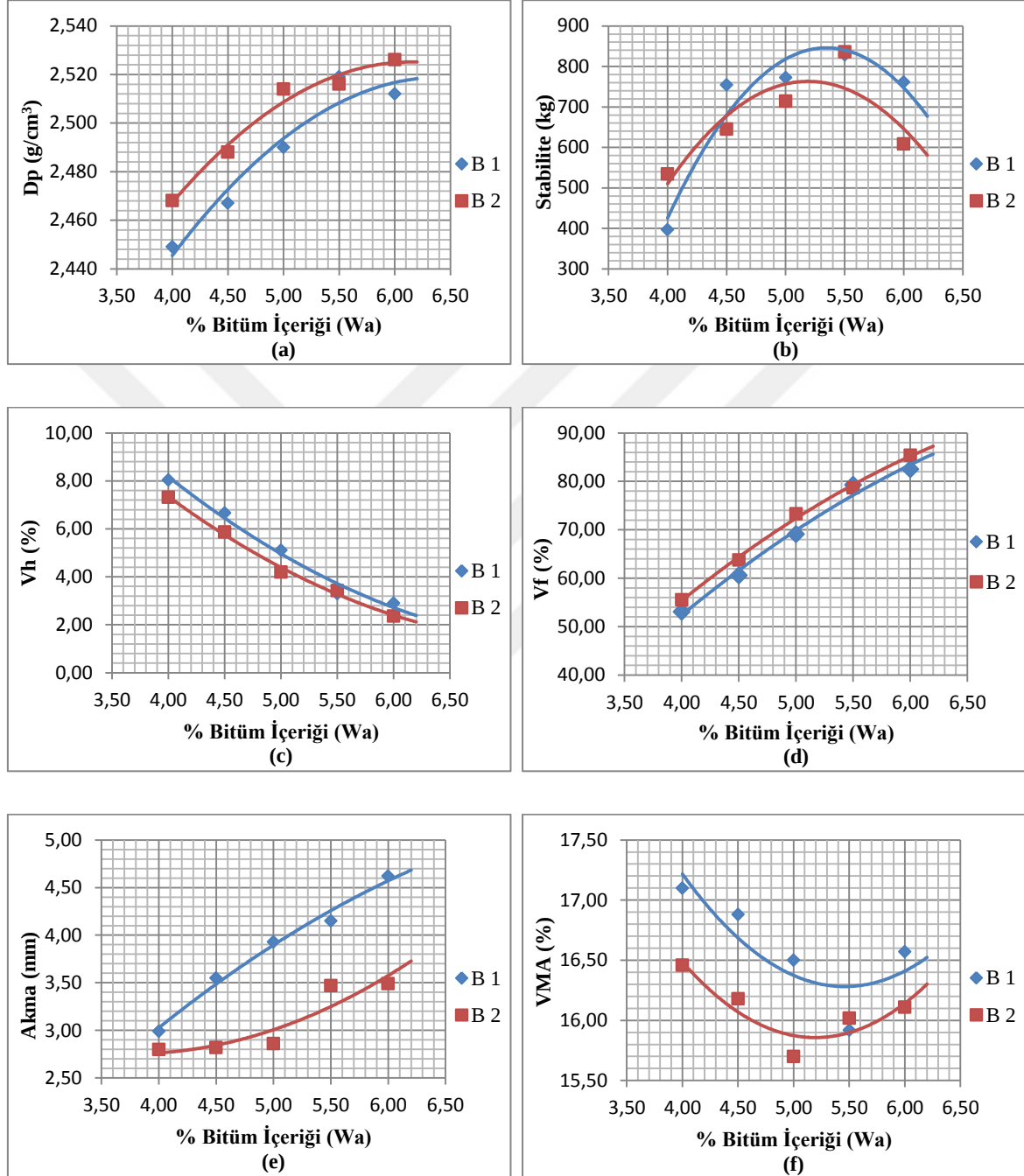
Tablo 3.4. K 1 ve K 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri

Karışım Türü	Optimum Bitüm Yüzdesi (%)	Dizayn Parametre Değerleri					
		Dp (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Vh (%)	Vf (%)	Akma (mm)	VMA (%)
K 1	4,71	2,398	1008	3,590	74,27	3,21	13,96
K 2	4,92	2,380	941	4,10	72,50	3,75	14,82
Şartname Sınır Değerler		-	min. 750	4 - 6	60 - 75	2 – 4	13 - 15

K 1 ve K 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri sırasıyla % 4,71 ve % 4,92 bulunmuştur. K 1 optimum bitüm yüzdesi K 2’ye göre % 4,28 düşüktür. Bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.4’te görüldüğü gibi KTŞ (2013) Binder Tabakası için verilen sınır şartlar gözetildiğinde her iki karışımın stabilite, akma, Vf ve VMA değerlerinin sınır şartları sağladığı görülmektedir. Optimum bitüm yüzdelerinde aynı kalker grubu kullanılarak hazırlanan karışımlardan K 1’in stabilite değeri K 2’nin stabilite değerine göre % 7,12 daha yüksek çıkmıştır. K 1 için boşluk yani Vh değeri şartname sınırları altında kalmıştır. Buna karşılık K 2 için Vh değeri şartname sınırları içerisinde kalmıştır.

Stabilite karışımlar için önemli bir faktördür. Eğer K 1 karışımının boşluk oranı, min. şartname sınırının üzerine çıksa idi, K 1 karışımı K 2’ye göre daha tercih edilebilirdi. Ayrıca ekonomik olarak da (% 4,71 bitüm oranı ile) daha uygun olabilirdi.

Ek Tablo.3 ve Ek Tablo.4'te verilen B 1 ve B 2 karışımlarına ait Marshall dizayn sonuçları yardımıyla elde edilen Dp - Wa, Stabilité - Wa, Vh - Wa, Vf - Wa, Akma - Wa, VMA - Wa grafikleri Şekil 3.2'de sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.2. B 1 ve B 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilité - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği

Şekil 3.2'de elde edilen grafikler yardımıyla agrega grubu bazalt olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri Tablo 3.5'te ve bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.5. B 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri

Özellik	B 1	B 2
Özgül ağırlık, Dp (g/cm ³), (maks.)	6,00	6,00
Stabilite (kg),(maks.)	5,50	5,50
Boşluk, Vh (%), (% 5)	4,95	4,78
Asfalt dolu boşluk yüzdesi, Vf (%), (% 67,5)	4,85	4,70
Optimum bitüm yüzdesi (%)	5,33	5,25

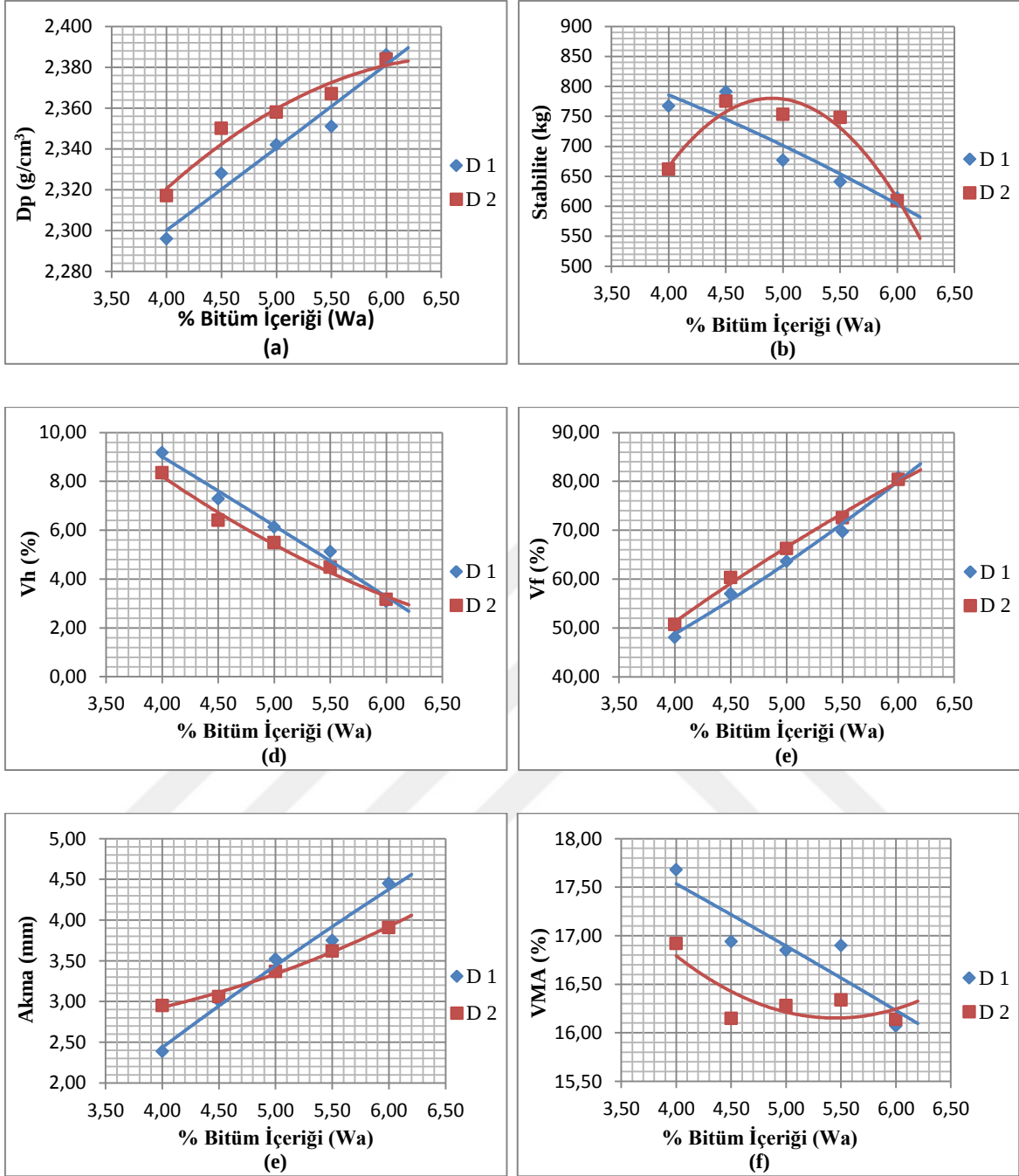
Tablo 3.6. B 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri

Karışım Türü	Optimum Bitüm Yüzdesi (%)	Dizayn Parametre Değerleri					
		Dp (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Vh (%)	Vf (%)	Akma (mm)	VMA (%)
B 1	5,33	2,503	846	4,11	74,78	4,10	16,29
B 2	5,25	2,514	762	3,80	75,96	3,12	15,85
Şartname Sınır Değerler	-	-	min. 750	4 - 6	60 – 75	2 - 4	13 - 15

B 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri sırasıyla % 5,33 ve % 5,25 bulunmuştur. B 2 optimum bitüm yüzdesi B 1'e göre % 1,5 düşüktür. Bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.6'da görüldüğü gibi her iki karışımın stabilite değerleri sınır şartları sağladığı görülmektedir. Optimum bitüm yüzdelerinde aynı bazalt grubu kullanılarak hazırlanan karışımlardan B 1'in stabilite değeri B 2'nin stabilite değerine göre % 11,03 daha yüksek çıkmıştır. B 1 için Vh, Vf değerleri şartname sınırları içerisinde olup akma ve VMA değerleri ise şartname sınırları üzerindedir. B 2 için akma değeri sınır şartlar içerisinde, Vh değeri sınır şartlar altında, Vf ve VMA değerleri ise sınır şartlar üzerinde bulunmuştur.

Ekonomi ve stabilite bakımından bakıldığında (% 5,33 bitüm oranı ile) B 1 karışımı daha uygundur. Ayrıca B 1 karışımının Vh ve akma değerleri çok küçük oranda sınır değerlerin üzerine çıkmıştır.

Ek Tablo.5 ve Ek Tablo.6'da verilen D 1 ve D 2 karışımlarına ait Marshall dizayn sonuçları yardımıyla elde edilen Dp - Wa, Stabilite - Wa, , Vh - Wa, , Vf - Wa, Akma - Wa, VMA - Wa grafikleri Şekil 3.3'te sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.3. D 1 ve D 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilite - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği

Şekil 3.3'te elde edilen grafikler yardımıyla agrega grubu dere malzemesi olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri Tablo 3.7'de ve bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.8'de verilmektedir.

Tablo 3.7. D 1 ve D 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri

Özellik	D 1	D 2
Özgül ağırlık, Dp (g/cm ³), (maks.)	6,00	6,00
Stabilite (kg),(maks.)	4,50	4,50
Boşluk, Vh (%), (% 5)	5,40	5,17
Asfalt dolu boşluk yüzdesi, Vf (%), (% 67,5)	5,26	5,07
Optimum bitüm yüzdesi (%)	5,29	5,19

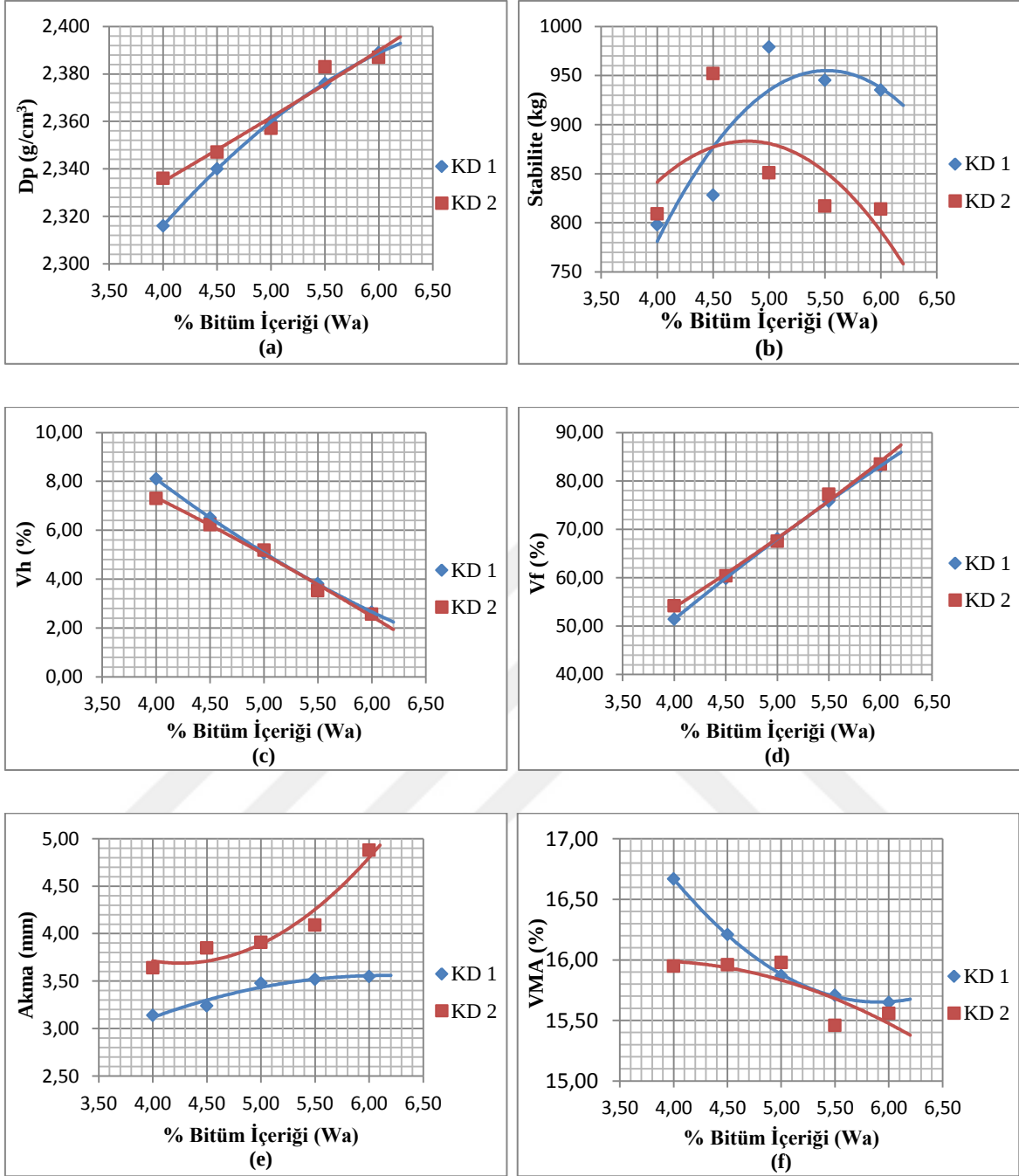
Tablo 3.8. D 1 ve D 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelere karşılık gelen dizayn parametre değerleri

Karışım Türü	Optimum Bitüm Yüzdesi (%)	Dizayn Parametre Değerleri					
		Dp (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Vh (%)	Vf (%)	Akma (mm)	VMA (%)
D 1	5,29	2,352	1058	5,35	67,90	3,72	17,34
D 2	5,19	2,364	769	4,96	69,21	3,44	16,17
Şartname Sınır Değerler		-	min. 750	4 - 6	60 - 75	2 - 4	13 - 15

D 1 ve D 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri sırasıyla % 5,29 ve % 5,19 bulunmuştur. D 2 optimum bitüm yüzdesi D 1'e göre % 1,9 düşüktür. Bu optimum bitüm yüzdelere karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.8'de görüldüğü gibi sınır şartlar gözetildiğinde her iki karışımın stabilite, akma, Vh ve Vf değerlerinin sınır şartları sağladığı görülmektedir. Optimum bitüm yüzdelinde aynı dere malzemesi grubu kullanılarak hazırlanan karışımlardan D 1'in stabilite değeri D 2'nin stabilite değerine göre % 37,58 daha yüksek çıkmıştır. D 1 ve D 2 için VMA değerleri şartname sınırları üzerinde kalmıştır.

Ekonomik olarak D 1 ve D 2 karışımları yakın değerdedir. VMA değerleri dikkate alınmadığında, stabilite bakımından düşünüldüğünde D 1 karışımı D 2'ye göre çok daha iyi sonuç vermiştir.

Ek Tablo.7 ve Ek Tablo.8'de verilen KD 1 ve KD 2 karışımlarına ait Marshall dizayn sonuçları yardımıyla elde edilen Dp - Wa, Stabilite - Wa, , Vh - Wa, , Vf - Wa, Akma - Wa, VMA - Wa grafikleri Şekil 3.4'te sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.4. KD 1 ve KD 2 karışımlarının (a) Dp - Wa grafiği, (b) Stabilité - Wa grafiği, (c) Vh - Wa grafiği, (d) Vf - Wa grafiği, (e) Akma - Wa grafiği, (f) VMA - Wa grafiği

Şekil 3.4'te elde edilen grafikler yardımıyla agrega grubu kalker + dere malzemesi olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri Tablo 3.9'da ve bu optimum bitüm yüzdelerine karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.10'da verilmektedir.

Tablo 3.9. KD 1 ve KD 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri

Özellik	KD 1	KD 2
Özgül ağırlık, D_p (g/cm ³), (maks.)	6,00	6,00
Stabilite (kg),(maks.)	5,00	4,50
Boşluk, V_h (%), (% 5)	5,00	5,00
Asfalt dolu boşluk yüzdesi, V_f (%), (% 67,5)	4,95	4,95
Optimum bitüm yüzdesi (%)	5,24	5,11

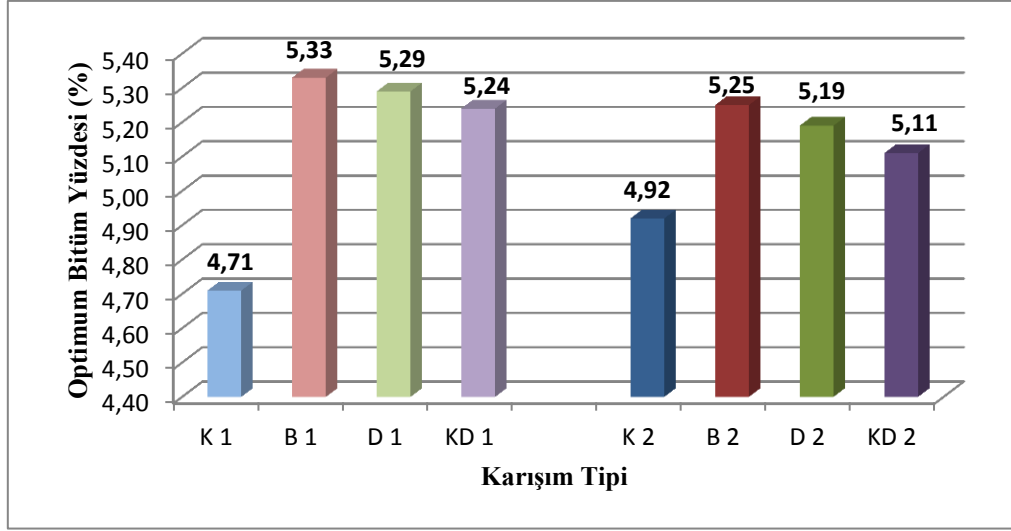
Tablo 3.10. KD 1 ve KD 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdelere karşılık gelen dizayn parametre değerleri

Karışım Türü	Optimum Bitüm Yüzdesi (%)	Dizayn Parametre Değerleri					
		D_p (g/cm ³)	Stabilite (kg)	V_h (%)	V_f (%)	Akma (mm)	VMA (%)
KD 1	5,24	2,369	949	4,44	71,78	3,48	15,78
KD 2	5,11	2,366	877	4,75	69,83	3,96	15,80
Şartname Sınır Değerler		-	min. 750	4 - 6	60 - 75	2 - 4	13 - 15

KD 1 ve KD 2 karışımlarının optimum bitüm yüzdeleri sırasıyla % 5,24 ve % 5,11 bulunmuştur. KD 2 optimum bitüm yüzdesi KD 1'e göre % 2,48 düşüktür. Bu optimum bitüm yüzdelere karşılık gelen dizayn parametre değerleri Tablo 3.10'da görüldüğü gibi şartname sınır şartlar gözetildiğinde her iki karışımın stabilite, akma, V_h ve V_f değerlerinin sınır şartları sağladığı görülmektedir. Optimum bitüm yüzdelerinde aynı kalker + dere malzemesi grubu kullanılarak hazırlanan karışımlardan KD 1'in stabilite değeri KD 2'nin stabilite değerine göre % 8,21 daha yüksek çıkmıştır. KD 1 ve KD 2 için VMA değerleri şartname sınırları üzerinde kalmıştır.

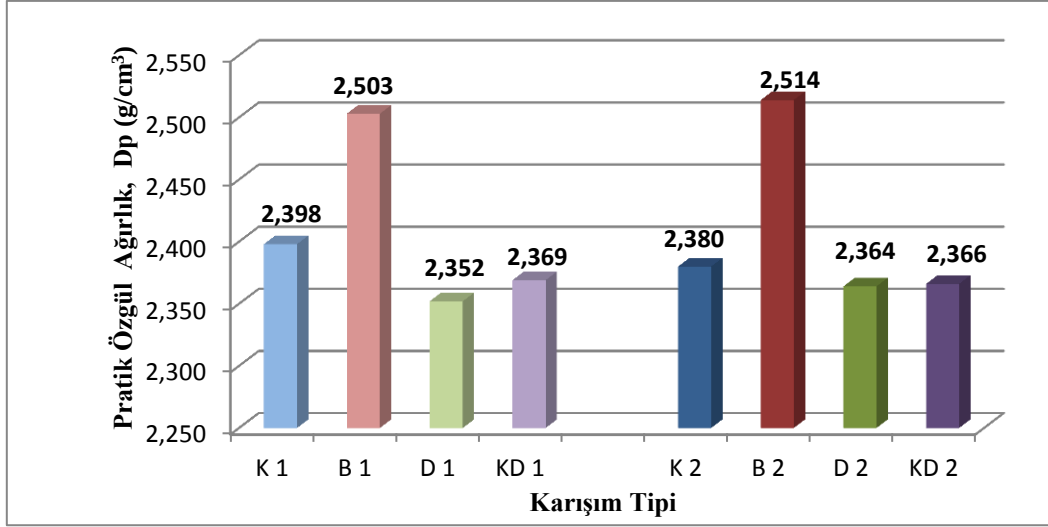
Stabilite bakımından KD 1 karışımı daha iyi durumdadır. Ancak (VMA dikkate alınmazsa) KD 2, stabilitesi minimum şartname sınır değerinin üzerinde çıktığından ve daha az bitüm ihtiva ettiğinden KD 1'e tercih edilebilir.

Çalışmada karışımların Şekil 3.1-3.4 arası grafiklerinden yararlanarak hesaplanan ve Tablo 3.3- 3.10 arası tablolarda sunulan optimum bitüm yüzdeleri ve bu optimum bitüm yüzdelere karşılık gelen dizayn parametre değerleri aşağıdaki gibi karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir.



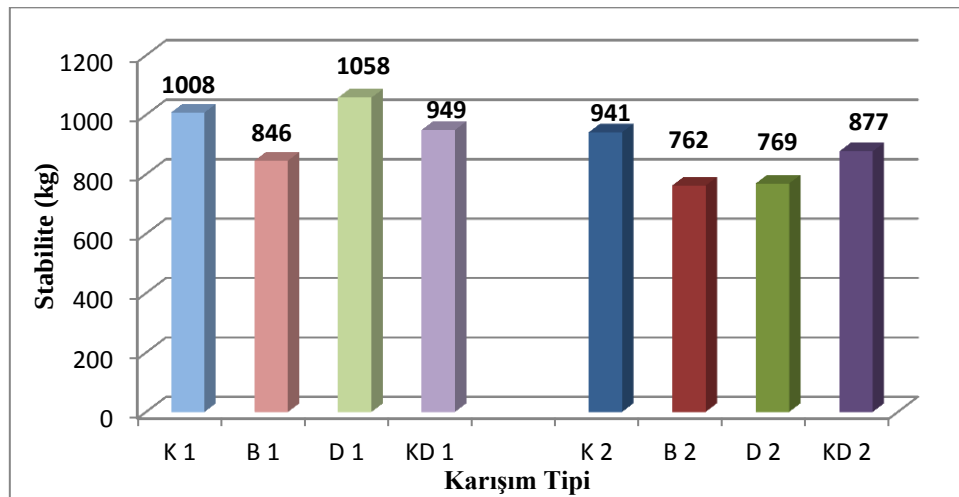
Şekil 3.5. Karışımların optimum bitüm oranlarının karşılaştırılması

Şekil 3.5’ te görüldüğü gibi 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda ve 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda en yüksek optimum bitüm oranları agrega grubu bazalt olan B 1 ve B 2 karışımlarında (sırasıyla % 5,33 ve % 5,25 oranları ile) elde edilmiştir. En düşük optimum bitüm yüzdeleri ise agrega grubu kalker olan K 1 ve K 2 karışımlarında (sırasıyla % 4,71 ve % 4,92 oranları ile) elde edilmiştir. Agrega grubu dere malzemesi olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri agrega grubu kalker olan karışımlardan yüksek agrega grubu bazalt olan karışımlardan düşük çıkmıştır. Bu sebeple agrega grubu kalker + dere malzemesi olan karışımların optimum bitüm yüzdeleri agrega grubu kalker olan karışımlara göre yüksek, agrega grubu bazalt olan karışımlara göre düşük çıktığı sonucu elde edilmiştir. Burada bazaltlı karışımların daha fazla bitüme gereksinim duyduğu ve bundan dolayı optimum bitüm oranlarının diğer karışımlara göre yüksek çıktığı söylenebilir.



Şekil 3.6. Optimum bitüm oranlarında karışımların pratik özgül ağırlıklarının karşılaştırılması

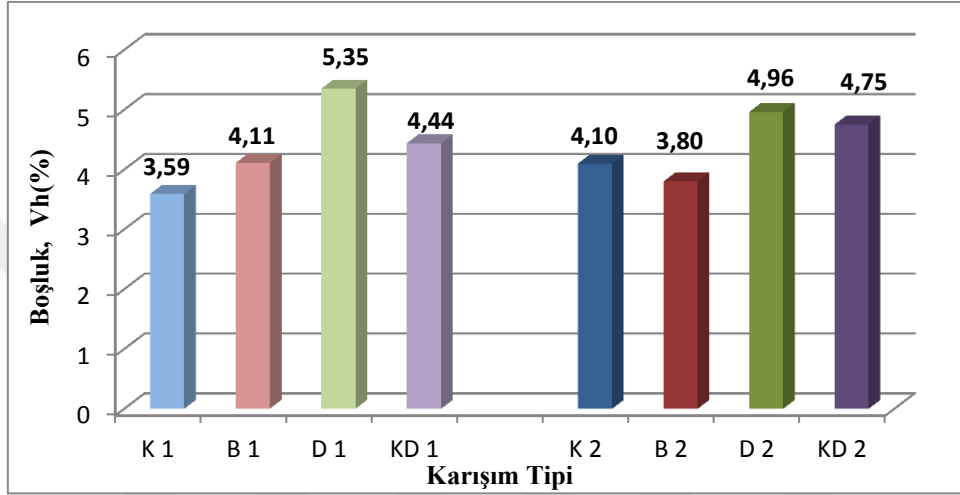
Şekil 3.6’da görüldüğü gibi en yüksek pratik özgül ağırlıklar agrega grubu bazalt olan karışımlarda elde edilmiştir. Diğer karışımların optimum bitüm oranlarında pratik özgül ağırlıkları birbirine yakın çıkmıştır. Pratik özgül ağırlık değerlerinin yüksek olması bitümlü kaplamalarda geçirimsizliğin, yaşlanma, soyulma ve sökülme bozulmalarına karşı dayanımın artışında daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Bazaltlı karışımların pratik özgül ağırlıklarının yüksek oluşu Bölüm 3.1’de verilen Tablo 3.1’de elde edilen sonuçlara göre bazaltın kaba, ince ve filler olarak özgül ağırlıklarının, kalker ve dere malzemesindeki kaba, ince ve filler olarak özgül ağırlıklarına göre yüksek oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



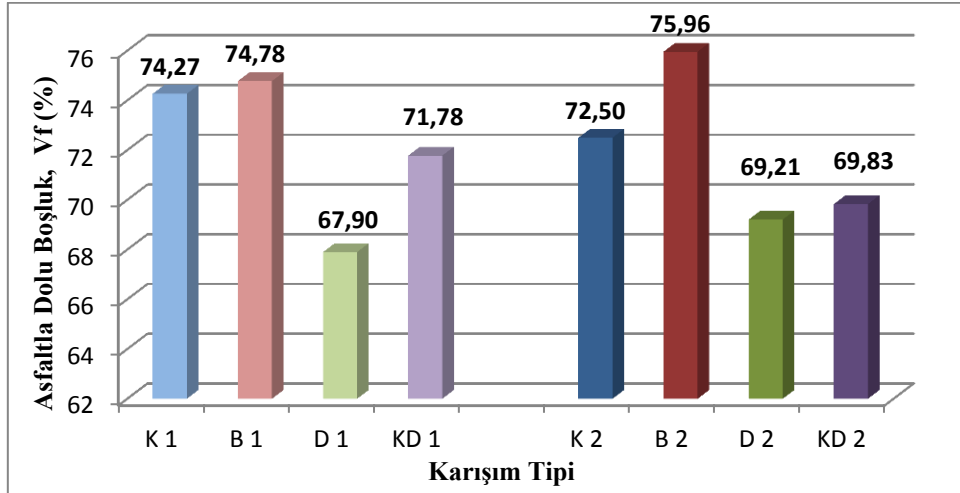
Şekil 3.7. Optimum bitüm oranlarında karışımların stabilite değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.7’e bakıldığında optimum bitüm oranlarında 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda en yüksek stabilite değeri dere malzemeli karışımda (D 1)

elde edilmiştir (1058 kg). 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda en yüksek stabilite değeri ise kalkerli karışımda (K 2) elde edilmiştir (941 kg). Tüm karışımların optimum bitüm oranlarında elde edilen sonuçlara göre 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımların stabilite değerleri, 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımların stabilite değerlerine göre yüksek çıkmıştır. Fakat elde edilen tüm sonuçlar şartname sınır şartları sağlamıştır.



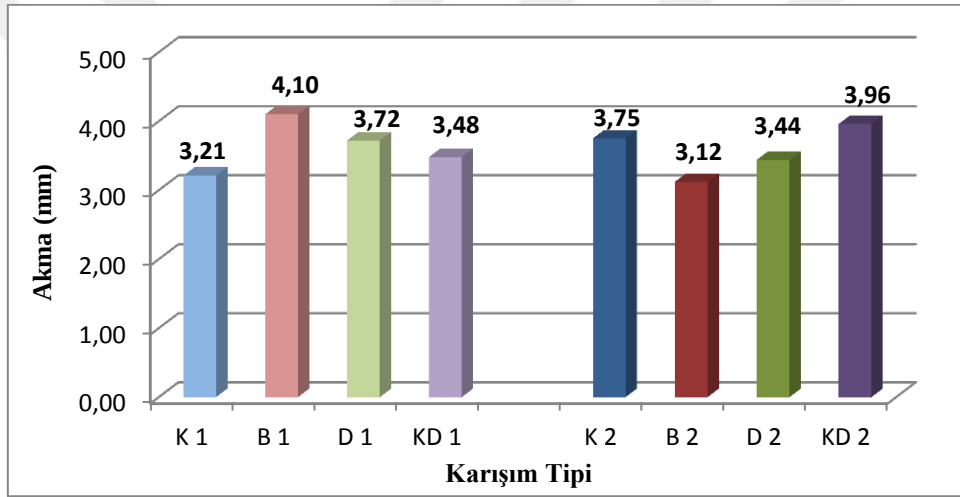
Şekil 3.8. Optimum bitüm oranlarında karışımların boşluk oranlarının karşılaştırılması



Şekil 3.9. Optimum bitüm oranlarında karışımların asfaltla dolu boşluk yüzdelерinin karşılaştırılması

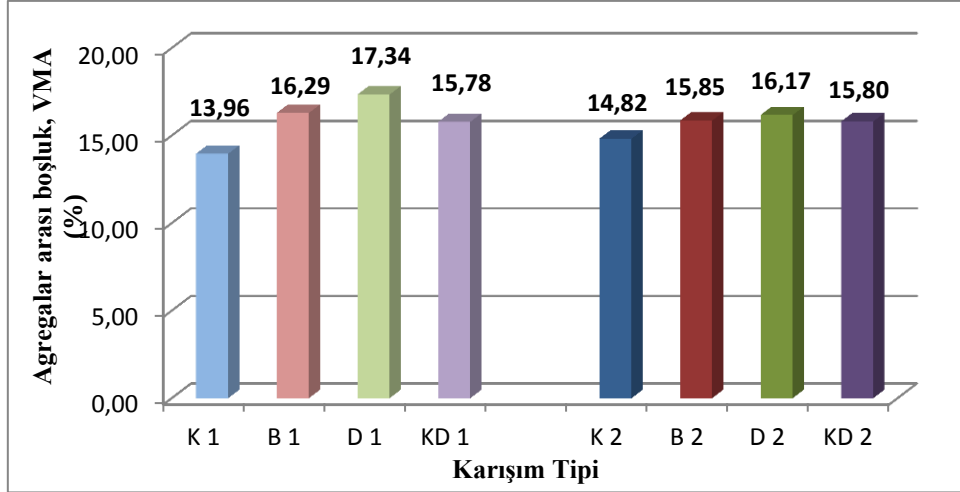
Şekil 3.8’de boşluk oranlarına ilişkin bulgulardan görüleceği üzere B 1, D 1, KD 1, K 2, D 2 ve KD 2 karışımlarının boşluk oranları şartname sınır şartları (4-6 arası) sağlamaktadır. K 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm oranlarındaki boşluk yüzdeleri şartname sınır değerinin altında kalmıştır. Bu durumda K 1 ve B 2 karışımları özellikle sıcaklığın iyice yükseldiği yaz aylarında bağlayıcı bitümün hacminin artması sonucu boşlukların tamamen dolarak kusmanın gerçekleşebileceği söylenebilir.

Şekil 3.9’da asfaltla dolu boşluk oranlarına bakıldığında B 2 hariç diğer tüm karışımların sonuçları şartname sınır şartları (65-75 arası) sağlamıştır. B 2 karışımının asfaltla dolu boşluk yüzdesi maks. sınır şartın üzerinde çıkmış fakat çok yakın sonuç elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Optimum bitüm oranlarında karışımların akma değerlerinin karşılaştırılması

Karışımların optimum bitüm oranlarında akma değerleri Şekil 3.10’da görüleceği üzere B 1 hariç şartname sınır şartların (2-4 arası) sağlandığı görülür. B 1 karışımının akma değeri 4,10 olup maks. sınır şartın üzerinde çıkmış fakat çok yakın sonuç elde edilmiştir.

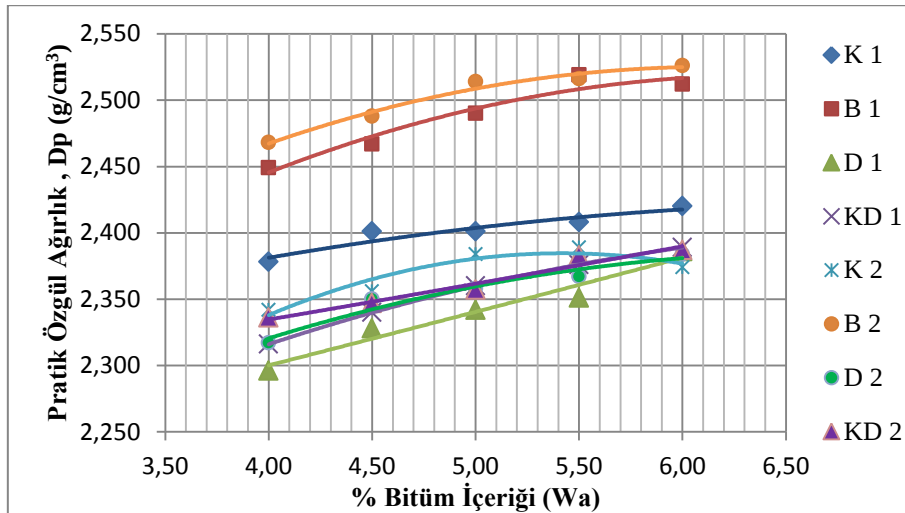


Şekil 3.11. Optimum bitüm oranlarında karışımların agregalar arası boşluk yüzdelерinin karşılaştırılması

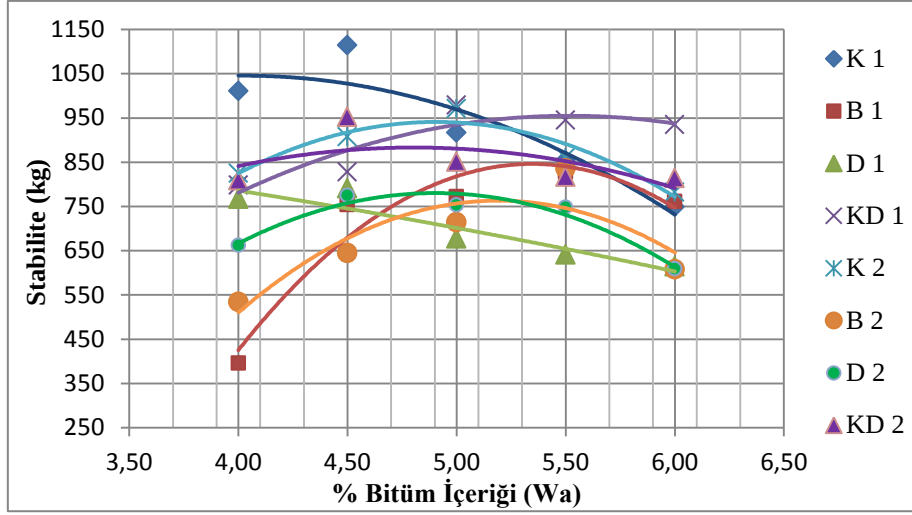
Şekil 3.11’de görüleceği üzere optimum bitüm oranlarında agregalar arası boşluk yüzdeleri kıyaslandığında kalkerli karışımların (K 1 ve K 2) şartname sınır şartları (13-15 arası) sağladığı görülmekte olup diğer karışımlardan elde edilen sonuçlarda sınır şartlar sağlanamamış ve yüksek çıkmıştır.

3.3. Marshall Deneyleri ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması ve İrdelenmesi

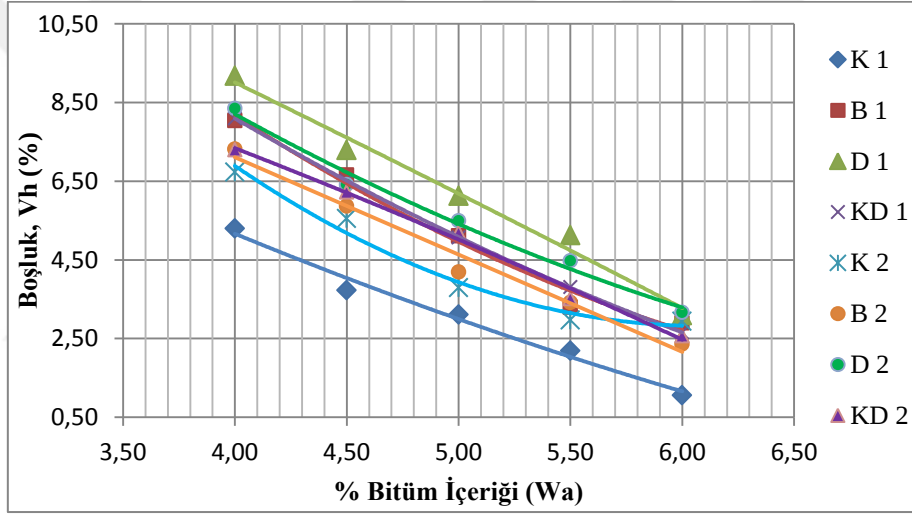
Çalışmada karışımlara uygulanan Marshall Deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir.



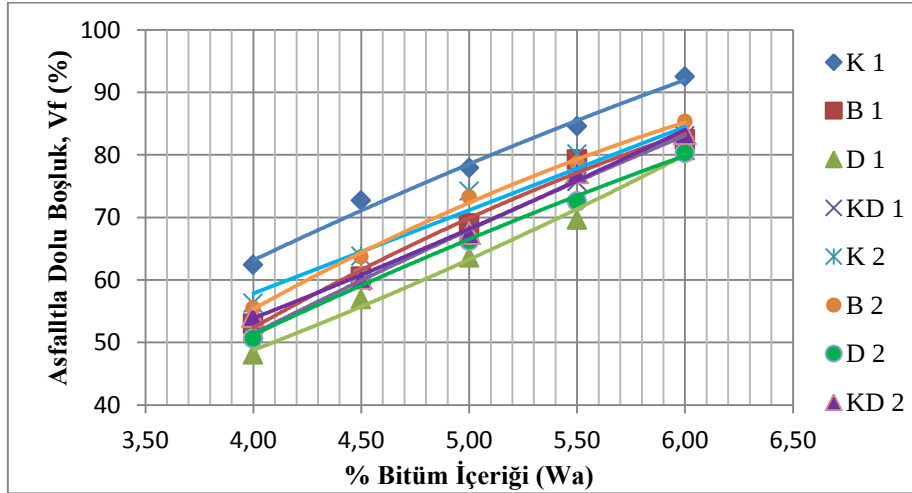
Şekil 3.12. Karışımların pratik özgül ağırlıklarının karşılaştırılması



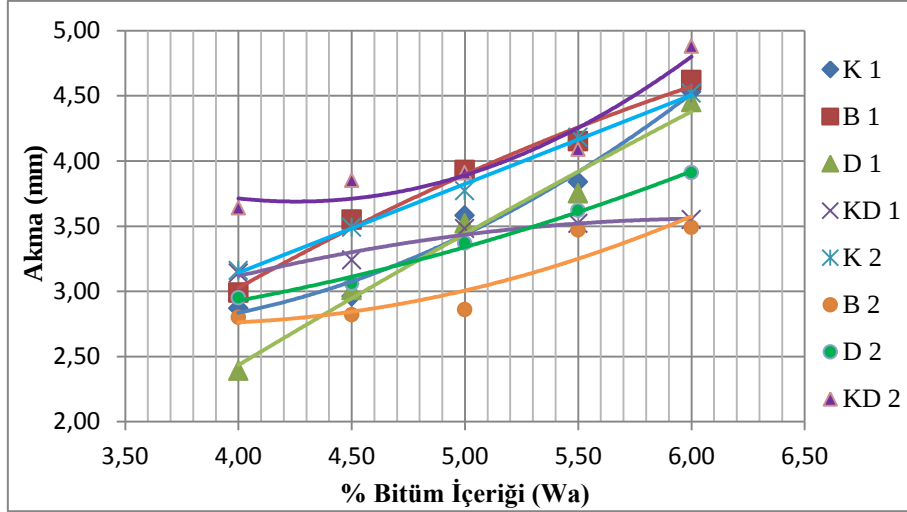
Şekil 3.13. Karışımların stabilite değerlerinin karşılaştırılması



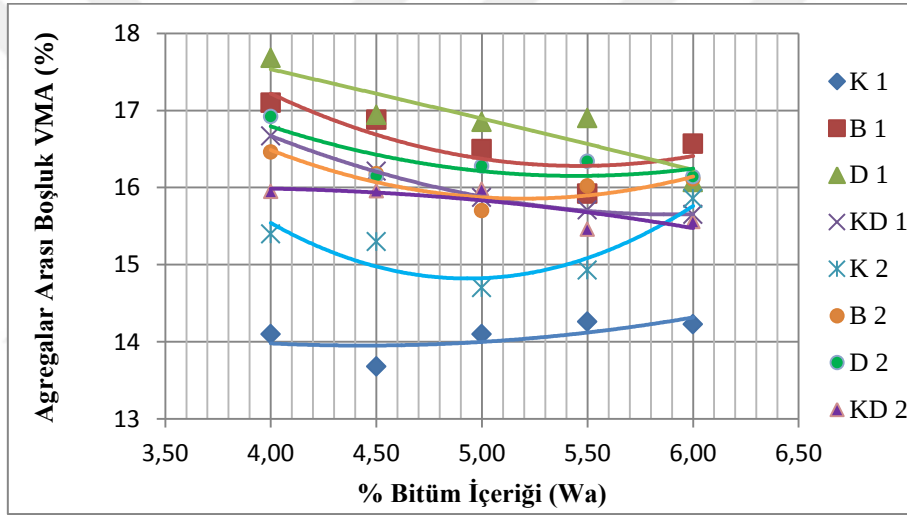
Şekil 3.14. Karışımların boşluk oranlarının karşılaştırılması



Şekil 3.15. Karışımların asfaltla dolu boşluk oranlarının karşılaştırılması



Şekil 3.16. Karışımların akma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.17. Karışımların agregalar arası boşluk oranlarının karşılaştırılması

Marshall dizaynı için hazırlanan tüm karışımların deneysel sonuçlarından elde edilen ve Şekil 3.12-3.17 arası verilen grafiklere göre değerlendirme yapılacak olunursa; Dp - Wa grafiklerinde (Şekil 3.12) bitüm yüzdesi arttıkça pratik özgül ağırlık artarak bir maksimumdan geçerek sonra düşüş sağlaması gerekir. Yapılan çalışmada bu bazı karışımlarda sağlanabilmiştir. Bunun sağlanması için bitüm oranlarının % 6'dan daha fazla denenmesi gerekli olduğu söylenebilir. Pratik özgül ağırlık değerlerinin yüksek olması bitümlü kaplamalarda geçirimsizliğin, yaşlanma, soyulma ve sökölme bozulmalarına karşı dayanımın artışında daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Bitüm miktarının artması ve agregada içerisindeki hava boşluklarının bitüme doyması sebebiyle pratik özgül ağırlıklarda düşüş gözlemlenebilir.

Sıkıştırılmış bitümlü karışımın kırılmaya karşı direnci stabilite olarak tanımlanmaktadır ve numunenin kırılması için gereken yük ile ifade edilmektedir. Karışımın stabilitesi büyük ölçüde kullanılan agreganın dayanımına ve agrega karışımının kenetlenmesine bağlıdır [22]. Yapılan tüm deneysel çalışma sonuçlarında tüm karışımların optimum bitüm yüzdelerinde stabilite değerleri (Şekil 3.13) şartname sınır şartları sağlamıştır.

Vh - Wa grafiklerinde (Şekil 3.14) bitüm yüzdesi arttıkça boşluk yüzdelerinde düşüş görülmektedir. Boşluk şartnamede belirtilen sınırlarının üstüne çıkarsa stabilitede düşme ve kaplamada erken bozulma görülebilir. Bununla birlikte sıcak iklimlerde kusma bozulması kontrolünün sağlanabilmesi için karışımda bir miktar boşluk olmalıdır [1]. Agreganın fazla boşluklu yapıda olması da karışımında boşluk oranını yükseltebilir.

Vf – Wa grafiklerinde (Şekil 3.15) bitüm yüzdesi arttıkça asfaltla dolu boşluk yüzdeleri de artış göstermektedir.

Asfaltla dolu boşluk, karışımların plastisite, durabilite ve sürtünme katsayısı gibi özellikleri kontrol etmekle birlikte agrega taneleri etrafında da katı bir bitüm filmi teşekkülü sağlar. Bu da soyulma, sökölme ve çevresel etkilere karşı dayanım açısından oldukça önemli bir özelliktir [1]. Karışım içerisine bitüm eklendikçe, bitüm hava boşluklarının yerini almaktadır. Eklenen bitüm, hava boşluklarını doldurarak karışımdaki hava boşluğu miktarını azaltmakta ve bitümle dolu boşluk oranını arttırmaktadır [22].

Bitümlü sıcak karışım içerisindeki agregalar arasındaki asfalt filmi hacmi ile boşluk hacminin toplamı mineral agregalar arasındaki boşluğu oluşturur. Mineral agregalar arasındaki boşluk agreganın bitüme kenetlenmesi ve durabilite açısından önemli bir özelliktir [1].

Akma - Wa grafiklerinde (Şekil 3.16) bitüm oranı arttıkça akma miktarının da arttığı görülmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlar için önemli bir özellik de akmadır. Karışımın plastiklik ve esneklik özellikleri hakkında fikir verir [1].

Akma, kırılma noktasına kadar sıkıştırılmış Marshall numunesindeki deformasyon olarak ölçülmektedir. Akma, karışımın plastiklik ve esneklik özelliklerini belirtmektedir. Karışım içerisindeki bitüm miktarının artması ile karışımın içsel sürtünmesi azalmakta ve plastikliği artmaktadır. Akma değerinin yüksek olması, kaplamanın dayanımını

düşürmekte ve yük altında deforme olmasına neden olmaktadır [22]. Yapılan tüm deney sonuçlarında optimum bitüm yüzdelerinde karışımların (B 1 hariç) akma değerleri şartname sınır değerleri sağlanmıştır. B 1 karışımı için optimum bitüm yüzdesinde akma değeri 4,10 mm olup şartname üst sınıra yakın sonuç alınmıştır.

VMA - Wa grafiklerine (Şekil 3.17) bakıldığında bitüm oranı arttıkça agregalar arası boşluğun minimum değere ulaşarak sonra tekrardan yükselişe geçtiği görülmektedir.

Agregalar arası boşluk miktarının fazla olmasından dolayı karışımların stabilite değerleri olumsuz yönde etkilenirler. Karışım içerisindeki agregalar arası boşluk miktarının azaltılması için karışımı oluşturan gradasyon limitlerinde değişim yapılması veya karışımın sıkıştırılmasında uygulanacak enerjinin arttırılması ile sağlanabileceği önerilebilir. Fakat bu değişikliklerin etkileri ayrıca çalışılıp incelenmelidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, değişik tipteki agrega ve bağlayıcının sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine etkisi araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu doğrultuda yapılan Marshall dizayn deneylerinde elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- K 1, K 2, B 1, B 2, D 1, D 2, KD 1 ve KD 2 karışımların optimum bitüm yüzdeleri sırasıyla % 4,71, % 4,92, % 5,33, % 5,25, % 5,29, % 5,19, % 5,24 ve % 5,11 bulunmuştur. En yüksek optimum bitüm oranları agrega grubu bazalt olan B 1 ve B 2 karışımlarında (sırasıyla % 5,33 ve % 5,25 oranları ile) elde edilmiştir. En düşük optimum bitüm yüzdeleri ise agrega grubu kalker olan K 1 ve K 2 karışımlarında (sırasıyla % 4,71 ve % 4,92 oranları ile) elde edilmiştir. Burada bazaltlı karışımların daha fazla bitüme gereksinim duyduğu ve bundan dolayı optimum bitüm oranlarının diğer karışımlara göre yüksek çıktığı söylenebilir.
- 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda en yüksek stabilite değeri dere malzemeli karışımda (D 1) elde edilmiştir (1058 kg). 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımlarda en yüksek stabilite değeri ise kalkerli karışımda (K 2) elde edilmiştir (941 kg). Tüm karışımların optimum bitüm oranlarında elde edilen sonuçlara göre 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımların stabilite değerleri, 160/220 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımların stabilite değerlerine göre yüksek çıkmıştır. Fakat elde edilen tüm sonuçlar şartname sınır şartları sağlamıştır.
- Optimum bitüm oranlarında en yüksek pratik özgül ağırlıklar (D_p) agrega grubu bazalt olan B 1 ve B 2 karışımlarında elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 2,503 gr/cm³ ve 2,514 gr/cm³'tür. Diğer karışımların optimum bitüm oranlarında pratik özgül ağırlıkları birbirine yakın çıkmıştır. Pratik özgül ağırlık değerlerinin yüksek olması bitümlü kaplamalarda geçirimsizliğin, yaşlanma, soyulma ve sökölme bozulmalarına karşı dayanımın artışında daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Bazaltlı karışımların pratik özgül ağırlıklarının yüksek oluşu agrega özgül ağırlık değerlerinin kalker ve dere malzemesine göre yüksek oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- B 1, D 1, KD 1, K 2, D 2 ve KD 2 karışımlarının boşluk oranları (V_h , (%)) optimum bitüm oranlarında şartname sınır şartları (4-6 arası) sağlamaktadır. K 1 ve B 2 karışımlarının optimum bitüm oranlarındaki boşluk yüzdeleri şartname sınır

değerinin altında kalmıştır. Bu durumda K 1 ve B 2 karışımları özellikle sıcaklığın iyice yükseldiği yaz aylarında bağlayıcı bitümün hacminin artması sonucu boşlukların tamamen dolarak kusmanın gerçekleşebileceği söylenebilir. Boşluk şartnamede belirtilen sınırlarının üstüne çıkarsa stabilitede düşme ve kaplamada erken bozulma görülebilir.

- Asfaltla dolu boşluk, karışımların plastisite, durabilite ve sürtünme katsayısı gibi özellikleri kontrol etmektedir. Bu da çevresel etkilere karşı dayanım açısından önemli bir özelliktir. Optimum bitüm oranlarında asfaltla dolu boşluk oranları (Vf, (%)) değerlendirildiğinde B 2 hariç diğer tüm karışımların sonuçları şartname sınır şartları (65-75 arası) sağlamıştır. B 2 karışımının asfaltla dolu boşluk yüzdesi (% 75,86) maks. sınır şartın üzerinde çıkmış fakat çok yakın sonuç elde edilmiştir.
- Karışımların optimum bitüm oranlarında akma değerleri (B 1 hariç) şartname sınır şartları (2-4 arası) sağlamıştır. B 1 karışımının akma değeri 4,10 olup maks. sınır şartın üzerinde çıkmış fakat çok yakın sonuç elde edilmiştir. Akma değerinin yüksek olması, kaplamanın dayanımını düşürerek ve yük altında deforme olmasına neden olabilir.
- Optimum bitüm oranlarında agregalar arası boşluk yüzdeleri (VMA, (%)) kıyaslandığında kalkerli karışımların (K 1 ve K 2) şartname sınır şartları (13-15 arası) sağladığı görülmekte olup diğer karışımlardan elde edilen sonuçlarda sınır şartlar sağlanamamış ve yüksek çıkmıştır. Agregalar arası boşluk miktarının fazla olması karışımların stabilite değerlerini olumsuz yönde etkiler. Karışım içerisindeki agregalar arası boşluk miktarının azaltılması için karışımı oluşturan gradasyon limitlerinde değişim yapılması veya karışımın sıkıştırılmasında uygulanacak enerjinin artırılması ile sağlanabileceği önerilebilir. Fakat bu değişikliklerin etkileri ayrıca çalışılıp incelenmelidir.
- Karışımlar ekonomik bakımdan değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.
 1. Stabilite karışımlar için önemli bir faktördür. Eğer K 1 karışımının boşluk oranı, min. şartname sınırının üzerine çıksa idi, K 1 karışımı K 2'ye göre daha tercih edilebilirdi. Ayrıca ekonomik olarak da (% 4,71 bitüm oranı ile) daha uygun olabilirdi.

2. Ekonomi ve stabilite bakımından bakıldığında (% 5,33 bitüm oranı ile) B 1 karışımı B 2 karışımına göre daha uygundur. Ayrıca B 1 karışımının V_h ve akma değerleri çok küçük oranda sınır değerin üzerine çıkmıştır.
3. Ekonomik olarak D 1 ve D 2 karışımları yakın değerdedir. VMA değerleri dikkate alınmadığında, stabilite bakımından düşünüldüğünde D 1 karışımı D 2'ye göre çok daha iyi sonuç vermiştir.
4. Stabilite bakımından KD 1 karışımı daha iyi durumdadır. Ancak (VMA dikkate alınmazsa) KD 2, stabilitesi minimum şartname sınır değerinin üzerinde çıktığından ve daha az bitüm ihtiva ettiğinden KD 1'e tercih edilebilir.

Marshall dizayn deneyleri sonucunda ekonomik açıdan en iyi olan K 2 karışımı optimum bitüm oranı % 4,92 olup aynı zamanda stabilite, akma, V_h , V_f ve VMA için verilen şartname sınır şartların hepsini sağlamıştır. Bundan dolayı da en iyi sonuçlar K 2 karışımında elde edilmiş ve tercih sebebidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Elmacı, A.**, 2011. Asfalt Betonunda Granit Arıtma Çamurunun Filler Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [2] **Akpolat, M.**, 2014. Ilık Karışım Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] **Avcı, E.**, 2009. Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [4] **Jones, R.**, Modifiers for Asphalt Concrete, *Air Force Engineering and Service Center Project*, No: ESL-TR-88-32, 93 p., 1990.
- [5] **Bagampadde, U., Isacsson, U., Kiggundu, B.M.**, 2005. Influence of Aggregate Chemical and Mineralogical Composition on Stripping in Bituminous Mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 6, 229-239.
- [6] **Kök, B. V., Kuloğlu, N.**, 2008. İki Aşamalı Karıştırma Yönteminin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12-1 (2008),35-48.
- [7] **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, 352 s.
- [8] **Akbulut, H., Gürer, C.**, 2006. Atık mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregası Olarak Değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergisi*, 3943-3960, Yazı 261.
- [9] **Al-Hourani, M.A. and Khedawi, T.S.**, 1998. Effect of Polymer and Limestone Dust On The Durability of Asphalt Paving Mixtures.
- [10] **Yayla, N.**, 2006. Karayolu Mühendisliği, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [11] **Ilıcalı, M.**, 1988. Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü., İstanbul.
- [12] **Yılmaz, A.**, 2008. Ferrokrom ve Silikoferrokrom Cürufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [13] **Ilıcalı, M.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları. 280s, İstanbul.
- [14] **Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G.**, 1998. Beton Yollar, s.1-2, İ.T.Ü. Yayınları, İstanbul.
- [15] **Yeğinobalı, A.**, 2009. Niçin Beton Yol, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [16] **Karaşahin, M.**, 1993. Resilient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements, *Doktora Tezi*, Nottingham Üniversitesi, Nottingham.
- [17] **Tunç, A.**, 2007. Yol Malzemeleri (Agrega, Asfalt, Bitümlü Karışımlar, Beton, Zemin) ve Uygulamaları, Nobel Yayınları 2. Baskı, Ankara.
- [18] **Umar, F., Ağar, E.**, 1991. Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 339s. İstanbul.

- [19] Saltan, M., Fındık, S., 2005. Geniş Tabanlı ve Çift Tekerlekli Ağır Taşıtların Karayolu Esnek Üstyapıları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, Cilt 2, 429-438.
- [20] Yılmaz, T., 2011. Karayolu Üstyapı Yönetim Sistemi Ve Kocaeli İli Baş iskele İlçesi Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İstanbul.
- [21] Dikbaş, A., Yonar F., 2013. EAF Çelik İzabe Cürufunun Karayolu İnşaatında Dolgu, Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanımı, *İ.T.Ü. Proje Yönetim Merkezi Semineri*, İstanbul.
- [22] Özüğurlu, B., 2015. Karayolu Esnek Üst Yapı Binder Tabakasında Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agregada Olarak Kullanımının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] Hanlı, E., 2009. Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Road Research Laboratory, 1970. A guide to the structural design of pavements for new roads, *Road Note 29*, London: H M Stationery Office.
- [25] FAA, 1995. Airport Pavement Design and Evaluation, AC 150/5320-6D.
- [26] Kaya, A. Ö., 2014. Esnek Üstyapı Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregada Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [28] National Asphalt Pavement Association and Federal Highways Administration, 2001. HMA Pavement Mix Type Selection Guide.
- [29] Lavin, P., 2003. Asphalt Pavements: A Practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects. CRC Press.
- [30] Morova1, N., Serin, S. ve Terzi, S., 2011. Bitüm Miktarının Asfalt Betonu Dayanımına Etkisinin Bulanık Mantık Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ.
- [31] Özay, O., 2011. Farklı Modifiye Katkılarıyla Hazırlanan Poroz Asfalt Karışımların Performansının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [32] Türk Asfalt Mütahhitleri Derneği Bülteni, 2014. Mart - Nisan, sayı:2.
- [33] Tunç, A. 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Evi, ISBN:975-6574003, İstanbul Temmuz 2001.
- [34] Eren, Ü., 2008. Asfaltitin Asfalt Betonunda Mineral Filler Olarak Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [35] Ağar, E. ve Umar, F., 1985 Yol Üstyapısı, 3. Baskı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [36] Önal, M.A., 1993. Kahramangil, M., Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

- [37] **Oruç, S.**, 1997. Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [38] **Ceylan, S.**, 2006. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması ve Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [39] **Kök, V.B.** 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [40] **Kuloğlu, N.** 2001. “Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler”, Turk J. Engin Environ Sci, 25, TÜBİTAK.
- [41] **Gürer, C.** 2005. Atık Mermer Parçalarının Yol Kaplamasında Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [42] **Macit, S.**, 2003. Reverber Fırın Cürufunun Sıcak Karışım Asfalt Betonunda Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [43] **Bostancıoğlu, M.**, 2012. Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [44] **Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [45] **Jenks, C., Jencks, C., Harrigan, E., Adcock, M., Delaney, E., ve Freer, H.** 2011. NCHRP Report 673: A manual for design of hot mix asphalt with commentary. Washington, DC: Transportation research board of the National academies.
- [46] **Terzi, S.**, 2000. Mermer toz atıkların asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [47] **Yılmaz, M.**, 2005. Polyester Reçinenin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [48] **Keçeciler, A. F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., ve Gökçe, A. F.**, 1990. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [49] **TSEN-12591.** 2011. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar, Kaplama Sınıfı, Bitümler ve Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [50] **Whiteoak, D., Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A.H. ve Lav, A.**, 2004. İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul.
- [51] **Kiggundu, B.M., Bagampadde U., Mukunya, J.S.**, 2002. Exploratory Stripping Studies on Bituminous Mixtures in Uganda. *Water Damage Symposium*, Laramie, WY.

- [52] **Namlı, R.**, 1995. Evsel Plastik Atıkların Yol Üstyapısında Kullanılma Olanığının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [53] **Karayolları Teknik Şartnamesi**, 2013. *KGM Yayını*, Ankara.
- [54] **Uçar, H.**, 2008. Kırmataşların Beton Agregasında ve Hazır Beton Tesislerinde Kullanılma Kriterleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Adana.
- [55] **ASTM C127**, 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [56] **ASTM C128**, 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [57] **Kizirgil, M.E.**, 2013. Stiren-Butadien-Stiren ve Uçucu Külün Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [58] **TS EN 15326+A1**, 2010. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yoğunluk ve Özgül Kütle Tayini-Kapiler Kapaklı Piknometre Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [59] **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.
- [60] **TS EN 12697-34**, 2007. Bitümlü Karışımlar-Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [61] **TS 3720**, 1983. Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları-Marshall ve Hubbart- Field Metotları ile, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [62] **Bedirhanoglu, İ.**, 2011. *Yapı Mazlemesi Ders Notları*, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- [63] **Önal, M.A. ve Karaca, S.**, 1990. Asfalt Beton ve Diğer Karışım Tipleri İçin Karışım Dizayn Metotları (Çeviri), Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

EKLER

Tablo 1. K 1 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	63,1	63,0	63,0	63,0	1182,3	691,7	1188,0	496,3	2,384					3,56	1018	1,013	1031
2	4,00	46	63,4	63,4	63,7	63,5	1191,8	695,9	1199,1	503,2	2,368					2,98	1056	1,000	1056
3	4,00	46	63,9	63,7	63,4	63,7	1187,6	697,1	1195,4	498,3	2,383					2,08	949	0,995	944
											2,378	2,510	5,30	14,10	62,43	2,87			1011
4	4,50	51,75	63,0	63,0	63,0	63,0	1195,0	702,6	1199,9	497,3	2,403					3,24	1248	1,013	1274
5	4,50	51,75	63,0	62,7	62,6	62,8	1193,0	702,0	1198,9	496,9	2,401					3,27	1013	1,018	1031
6	4,50	51,75	62,9	62,7	62,5	62,7	1193,0	698,9	1196,0	497,1	2,400					2,38	1016	1,021	1037
											2,401	2,490	3,73	13,68	72,74	2,96			1114
7	5,00	57,5	63,5	63,1	63,1	63,2	1199,4	701,1	1202,8	501,7	2,391					3,63	1098	1,008	1107
8	5,00	57,5	63,0	63,5	63,0	63,2	1180,1	692,8	1185,2	492,4	2,397					3,79	796	1,008	802
9	5,00	57,5	62,7	63,3	63,0	63,0	1198,2	704,9	1201,3	496,4	2,414					3,31	830	1,013	841
											2,401	2,480	3,11	14,10	77,96	3,58			917
10	5,50	63,25	62,7	62,9	63,0	62,9	1199,5	704,3	1201,2	496,9	2,414					3,52	816	1,016	865
11	5,50	63,25	63,0	63,1	63,3	63,1	1203,6	703,6	1206,1	502,5	2,395					4,32	887	1,011	897
12	5,50	63,25	62,5	63,0	64,0	63,2	1205,0	708,3	1207,4	499,1	2,414					3,68	793	1,008	799
											2,408	2,460	2,19	14,26	84,62	3,84			854
13	6,00	69	62,9	62,5	62,5	62,6	1205,3	709,1	1206,1	497,0	2,425					4,46	751	1,023	768
14	6,00	69	62,7	63,0	62,8	62,8	1202,6	706,5	1203,3	496,8	2,421					4,35	713	1,018	726
15	6,00	69	63,0	62,8	63,0	63,0	1215,9	714,2	1217,6	503,4	2,415					4,78	740	1,016	752
											2,420	2,450	1,06	14,23	92,53	4,53			749

Tablo 2. K 2 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	63,2	63,4	64,0	63,5	1192,1	693,8	1200,7	506,9	2,352					2,70	747	1,000	747
2	4,00	46	63,2	63,5	63,5	63,4	1190,0	692,1	1199,7	507,6	2,344					3,48	892	1,003	895
3	4,00	46	63,5	63,6	63,4	63,5	1182,8	684,7	1192,2	507,5	2,331					3,29	833	1,000	833
											2,342	2,510	6,73	15,40	56,30	3,16			825
4	4,50	51,75	63,4	63,6	64,0	63,7	1197,3	692,1	1204,1	512,0	2,338					3,60	819	0,995	815
5	4,50	51,75	63,7	63,5	63,5	63,5	1196,9	694,2	1201,5	507,3	2,359					3,43	822	1,000	822
6	4,50	51,75	63,0	62,8	63,0	62,9	1196,6	696,3	1200,8	504,5	2,372					3,44	1067	1,016	1084
											2,356	2,490	5,55	15,30	63,83	3,49			907
7	5,00	57,5	61,8	62,2	62,4	62,1	1196,4	698,1	1199,0	500,9	2,389					3,44	1140	1,036	1181
8	5,00	57,5	62,5	62,6	63,0	62,7	1200,7	700,5	1202,4	501,9	2,392					3,65	879	1,021	898
9	5,00	57,5	63,7	63,3	63,0	63,3	1194,6	693,1	1197,0	503,9	2,371					4,21	828	1,006	833
											2,384	2,480	3,79	14,70	74,20	3,77			971
10	5,50	63,25	62,0	62,1	62,5	62,2	1187,8	690,6	1190,0	499,4	2,378					3,88	739	1,033	763
11	5,50	63,25	62,0	62,5	62,5	62,3	1208,1	704,7	1209,6	504,9	2,393					4,45	752	1,031	775
12	5,50	63,25	61,8	61,9	61,8	61,8	1197,1	698,5	1198,2	499,7	2,396					4,20	996	1,044	1040
											2,389	2,460	2,97	14,93	80,15	4,18			860
13	6,00	69	62,3	62,2	62,7	62,4	1206,3	701,3	1206,9	505,6	2,386					4,71	805	1,028	828
14	6,00	69	61,9	62,0	62,5	62,0	1210,1	700,6	1210,4	509,8	2,374					4,72	753	1,038	782
15	6,00	69	62,9	63,1	63,0	63,0	1209,2	699,0	1210,8	511,8	2,363					4,12	727	1,013	737
											2,374	2,450	2,94	15,86	81,44	4,52			782

Tablo 3. B 1 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşlu k %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	62,2	62,3	62,0	62,2	1176,5	707,5	1189,3	481,8	2,442					2,89	336	1,033	347
2	4,00	46	62,4	62,5	62,4	62,4	1185,8	712,2	1196,7	484,5	2,448					3,19	439	1,028	451
3	4,00	46	61,7	62,0	61,6	61,8	1178,9	709,2	1188,8	479,6	2,458					2,88	373	1,044	389
											2,449	2,660	8,04	17,10	53,02	2,99			396
4	4,50	51,75	63,0	62,7	63,0	62,9	1192,7	717,6	1201,7	484,1	2,464					3,74	765	1,016	777
5	4,50	51,75	62,2	62,1	62,0	62,1	1193,5	718,2	1201,4	483,2	2,470					3,75	746	1,036	773
6	4,50	51,75	62,5	62,0	62,4	62,3	1193,9	718,6	1202,3	483,7	2,468					3,16	689	1,031	710
											2,467	2,640	6,66	16,88	60,56	3,55			754
7	5,00	57,5	62,0	62,0	61,9	62,0	1202,9	722,8	1208,2	485,4	2,478					3,34	762	1,038	791
8	5,00	57,5	61,4	61,0	61,0	61,1	1199,4	724,5	1205,3	480,8	2,495					4,53	641	1,064	682
9	5,00	57,5	61,4	61,2	61,4	61,3	1197,6	723,2	1202,8	479,6	2,497					3,92	796	1,059	843
											2,490	2,620	5,11	16,50	69,06	3,93			772
10	5,50	63,25	60,7	60,2	60,5	60,5	1200,0	728,1	1201,8	473,7	2,533					5,11	888	1,082	961
11	5,50	63,25	61,1	60,9	61,2	61,1	1192,7	719,2	1194,7	475,5	2,508					3,50	778	1,064	828
12	5,50	63,25	60,5	60,5	60,2	60,4	1194,7	723,5	1198,2	474,7	2,517					3,84	640	1,085	694
											2,519	2,610	3,30	15,92	79,27	4,15			828
13	6,00	69	60,6	60,5	60,5	60,5	1200,5	724,5	1202,5	478,0	2,512					4,13	688	1,082	744
14	6,00	69	60,2	60,5	60,4	60,4	1200,5	726,3	1202,5	476,2	2,521					4,46	789	1,085	856
15	6,00	69	60,3	60,2	60,0	60,2	1180,9	712,2	1183,8	471,6	2,504					5,28	626	1,090	682
											2,512	2,590	2,90	16,57	82,50	4,62			761

Tablo 4. B 2 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	61,0	61,0	61,0	61,0	1182,6	712,0	1190,2	478,2	2,473					3,15	578	1,067	617
2	4,00	46	61,1	61,4	61,2	61,2	1178,0	709,6	1187,4	477,8	2,465					2,47	450	1,062	478
3	4,00	46	61,1	61,0	61,3	61,1	1172,6	706,7	1182,3	475,6	2,466					2,78	476	1,064	507
											2,468	2,660	7,32	16,46	55,51	2,80			534
4	4,50	51,75	61,3	61,4	61,0	61,2	1189,6	716,1	1196,0	479,9	2,479					2,39	573	1,062	609
5	4,50	51,75	61,4	61,5	61,4	61,4	1198,5	724,0	1205,5	481,5	2,489					2,86	586	1,056	619
6	4,50	51,75	61,1	61,0	61,0	61,0	1192,2	720,7	1198,4	477,7	2,496					3,20	663	1,067	707
											2,488	2,640	5,87	16,18	63,74	2,82			645
7	5,00	57,5	60,0	60,4	60,0	60,1	1188,8	721,1	1193,0	471,9	2,519					2,40	684	1,094	748
8	5,00	57,5	61,0	60,9	60,7	60,9	1199,0	726,7	1203,5	476,8	2,515					3,29	654	1,070	700
9	5,00	57,5	60,0	60,1	60,0	60,0	1184,5	716,2	1188,7	472,5	2,507					2,88	632	1,097	693
											2,514	2,620	4,19	15,70	73,30	2,86			714
10	5,50	63,25	60,0	60,1	60,0	60,0	1190,5	723,3	1193,7	470,4	2,531					2,72	683	1,097	749
11	5,50	63,25	62,4	63,0	62,8	62,7	1210,3	729,2	1213,4	484,2	2,500					3,96	820	1,021	837
12	5,50	63,25	60,5	60,4	61,0	60,6	1202,5	726,4	1204,3	477,9	2,516					3,72	855	1,079	923
											2,516	2,610	3,42	16,02	78,67	3,47			836
13	6,00	69	59,5	59,6	59,4	59,5	1188,5	719,5	1190,0	470,5	2,526					3,41	609	1,114	678
14	6,00	69	60,0	59,0	59,4	59,5	1185,4	717,6	1187,7	470,1	2,522					3,37	511	1,114	569
15	6,00	69	60,0	60,0	60,0	60,0	1206,6	730,5	1207,5	477,0	2,530					3,69	525	1,097	576
											2,526	2,590	2,36	16,11	85,36	3,49			608

Tablo 5. D 1 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	64,7	64,4	64,6	64,6	1173,4	678,4	1190,8	512,4	2,290					2,04	761	0,972	740
2	4,00	46	66,1	66,1	66,0	66,1	1184,5	680,5	1200,3	519,8	2,279					2,59	757	0,938	710
3	4,00	46	64,7	64,5	64,4	64,5	1176,6	684,4	1191,5	507,1	2,320					2,54	873	0,975	851
											2,296	2,530	9,18	17,68	48,09	2,39			767
4	4,50	51,75	65,1	65,2	65,3	65,2	1192,2	691,5	1203,7	512,2	2,328					2,91	898	0,957	859
5	4,50	51,75	64,7	64,6	64,9	64,7	1194,7	692,3	1202,5	510,2	2,342					3,27	767	0,970	744
6	4,50	51,75	64,5	64,7	65,0	64,7	1184,4	684,2	1195,9	511,7	2,315					2,86	793	0,970	769
											2,328	2,510	7,29	16,94	56,97	3,01			791
7	5,00	57,5	65,4	65,8	65,5	65,6	1191,4	691,3	1202,1	510,8	2,332					4,08	747	0,949	614
8	5,00	57,5	65,0	65,0	65,3	65,1	1191,8	695,1	1200,3	505,2	2,359					3,24	695	0,960	571
9	5,00	57,5	65,8	65,5	65,5	65,6	1198,3	693,7	1206,6	512,9	2,336					3,24	691	0,949	561
											2,342	2,500	6,13	16,85	63,61	3,52			677
10	5,50	63,25	65,6	65,0	65,1	65,2	1197,4	692,5	1204,4	511,9	2,339					4,29	593	0,957	568
11	5,50	63,25	63,3	63,6	63,4	63,4	1179,7	684,3	1185,5	501,2	2,354					3,35	589	1,003	591
12	5,50	63,25	64,2	65,7	64,2	64,7	1191,8	691,9	1197,0	505,1	2,360					3,69	788	0,970	764
											2,351	2,480	5,13	16,90	69,68	3,75			641
13	6,00	69	64,0	64,3	64,1	64,1	1204,1	697,6	1206,3	508,7	2,367					4,24	640	0,985	827
14	6,00	69	62,5	62,7	62,4	62,5	1202,6	706,2	1205,0	498,8	2,411					5,76	626	1,026	745
15	6,00	69	64,4	65,0	64,8	64,7	1217,2	708,5	1220,2	511,7	2,379					3,35	588	0,970	667
											2,386	2,460	3,09	16,07	80,79	4,45			614

Tablo 6. D 2 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	64,2	64,0	63,7	64,0	1172,6	679,0	1184,2	505,2	2,321					2,64	632	0,988	624
2	4,00	46	64,6	64,7	64,4	64,6	1187,0	686,1	1199,5	513,4	2,312					2,97	644	0,972	626
3	4,00	46	64,0	64,6	64,9	64,5	1181,8	681,3	1191,1	509,8	2,318					3,25	754	0,975	735
											2,317	2,530	8,35	16,92	50,68	2,95			662
4	4,50	51,75	63,6	63,8	64,0	63,8	1191,6	689,1	1188,9	499,8	2,384					2,82	919	0,992	912
5	4,50	51,75	64,0	64,0	63,8	63,9	1197,3	693,0	1207,0	514,0	2,329					3,13	741	0,990	734
6	4,50	51,75	64,4	64,5	65,0	64,6	1192,7	691,7	1201,9	510,2	2,338					3,23	699	0,972	679
											2,350	2,510	6,41	16,15	60,30	3,06			775
7	5,00	57,5	63,7	63,8	63,7	63,7	1198,0	699,0	1202,8	503,8	2,378					3,17	702	0,995	699
8	5,00	57,5	64,0	64,1	64,0	64,0	1200,3	693,6	1204,9	511,3	2,348					3,86	733	0,988	724
9	5,00	57,5	64,5	64,8	64,1	64,5	1195,9	691,3	1200,4	509,1	2,349					3,07	858	0,975	837
											2,358	2,500	5,49	16,28	66,28	3,37			753
10	5,50	63,25	63,4	63,3	63,6	63,4	1200,9	699,5	1204,3	504,8	2,379					2,89	774	1,003	776
11	5,50	63,25	64,0	64,2	64,0	64,1	1207,3	697,5	1210,8	513,3	2,352					3,62	691	0,985	681
12	5,50	63,25	62,5	62,2	63,2	62,6	1202,1	698,1	1205,4	507,3	2,369					4,34	768	1,023	786
											2,367	2,480	4,48	16,34	72,58	3,62			748
13	6,00	69	63,5	63,6	63,3	63,5	1209,7	703,5	1211,7	508,2	2,380					4,04	594	1,000	594
14	6,00	69	63,0	62,8	63,0	62,9	1208,2	703,3	1209,9	506,6	2,385					3,90	607	1,016	617
15	6,00	69	62,5	62,4	62,1	62,3	1206,8	702,2	1208,0	505,8	2,386					3,78	599	1,031	618
											2,384	2,460	3,17	16,14	80,37	3,91			609

Tablo 7. KD 1 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	65,3	65,4	65,0	65,2	1186,7	686,8	1197,3	510,5	2,325					3,04	928	0,957	888
2	4,00	46	65,2	65,5	65,1	65,3	1184,8	683,5	1197,4	513,9	2,306					3,23	741	0,955	708
											2,316	2,520	8,10	16,67	51,44	3,14			798
3	4,50	51,75	65,0	65,0	65,0	65,0	1191,4	691,8	1200,1	508,3	2,344					3,10	853	0,962	821
4	4,50	51,75	65,3	65,0	64,4	64,9	1184,2	686,2	1193,4	507,2	2,335					3,37	866	0,965	836
											2,340	2,500	6,51	16,21	59,83	3,24			828
5	5,00	57,5	65,0	64,4	64,0	64,5	1188,6	690,2	1195,2	505,0	2,354					3,71	1097	0,975	1067
6	5,00	57,5	63,2	63,5	63,6	63,4	1189,0	690,9	1193,5	502,6	2,366					3,24	886	1,003	889
											2,360	2,490	5,07	15,87	68,07	3,48			979
7	5,50	63,25	63,3	63,3	63,0	63,2	1191,3	695,5	1194,0	498,5	2,390					3,81	1068	1,008	1077
8	5,50	63,25	63,8	63,5	64,2	63,8	1186,0	689,2	1191,3	502,1	2,362					3,22	820	0,992	813
											2,376	2,470	3,81	15,71	75,77	3,52			945
9	6,00	69	63,0	63,0	63,2	63,1	1189,2	692,7	1192,0	499,3	2,382					4,02	952	1,011	963
10	6,00	69	61,0	61,0	60,5	60,8	1160,8	679,5	1164,2	484,7	2,395					3,08	845	1,073	907
											2,389	2,450	2,65	15,65	83,08	3,55			935

Tablo 8. KD 2 karışımına ait Marshall föyü

Br ik et N o	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm³)	Hac. Öz. Ağırlık	Maks. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk %	Ag. Ar. Boşluk %	Asf. Dolu Boşluk %	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa (%)	(gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	DT	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)
1	4,00	46	64,0	64,0	63,8	63,9	1178,8	685,3	1188,4	506,9	2,343					3,06	814	0,990	806
2	4,00	46	64,0	64,2	64,0	64,1	1176,8	682,3	1187,5	507,6	2,329					4,21	824	0,985	812
											2,336	2,520	7,30	15,95	54,22	3,64			809
3	4,50	51,75	64,4	64,5	65,0	64,6	1201,9	695,0	1207,1	512,0	2,347					3,61	998	0,972	970
4	4,50	51,75	65,0	64,8	64,9	64,9	1186,4	687,9	1193,6	507,3	2,346					4,09	968	0,965	934
											2,347	2,500	6,23	15,96	60,35	3,85			952
5	5,00	57,5	64,0	63,7	64,0	63,9	1192,3	694,5	1196,6	500,9	2,375					3,85	918	0,990	909
6	5,00	57,5	64,0	64,7	64,0	64,2	1189,5	687,7	1196,2	501,9	2,339					3,96	807	0,982	793
											2,357	2,490	5,19	15,98	67,52	3,91			851
7	5,50	63,25	63,4	63,3	63,0	63,2	1200,3	700,0	1202,6	499,4	2,388					3,61	745	1,008	751
8	5,50	63,25	62,7	63,0	63,0	62,9	1199,1	699,3	1203,5	504,9	2,378					4,57	870	1,016	884
											2,383	2,470	3,52	15,46	77,22	4,09			817
9	6,00	69	64,2	65,0	64,8	64,7	1215,1	708,2	1217,5	505,6	2,386					4,82	826	0,970	801
10	6,00	69	64,4	64,4	64,4	64,4	1215,5	707,9	1217,2	509,3	2,387					4,94	846	0,978	827
											2,387	2,450	2,57	15,56	83,49	4,88			814

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kahramanmaraş'ta tamamladıktan sonra Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında, çift anadal programı dahilinde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden de 2014 yılında mezun oldu. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime ve 2014 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. 2017 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. Şu anda ise İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini bitirmek üzeredir.