

131203.6

**ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN
ASFALT BETON KAPLAMA KARIŞIMINDA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

ALTAN ÇETİN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS - 1997

**ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
MERKEZ KÜTÜPHANESİ**

Altan ÇETİN'in yüksek lisans tezi olarak hazırladığı “ Endüstriyel Atıkların Asfalt Beton Kaplama Karışımında Değerlendirilmesi” başlıklı tez 26.08.1997 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Tez Danışmanı) : Doç.Dr. Mustafa TUNCAN

Üye : Doç.Dr. Ahmet TUNCAN

Üye : Yard.Doç.Dr. Gülgün ÜNAL

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...27.08.1997...tarih ve ...14/1..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
MERKEZ KÜTÜPHANASI**

**Prof. Dr. Ersan PÜTÜN
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü**

Enstitü Müdürü

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ASFALT BETON KAPLAMA KARIŞIMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ****ALTAN ÇETİN****Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doç.Dr. Mustafa TUNCAN
1997, Sayfa 99**

Bu çalışmada otomobil lastiği, plastik (polietilen), kül, petrolü sondaj atığı ve mermer tozu gibi endüstriyel atıkların asfalt beton kaplama karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan asfalt çimentosu ve agregası Türk standartlarına göre seçilmiştir. Lastik parçaları taşıt lastiklerinin dilimlenmesinden elde edilmiştir. Lastik ve plastik parçalarının miktarı %5, %10 ve %20 olarak seçilmiştir. Lastik tozları, kül, petrolü sondaj atığı, mermer tozu, kireç ve çimento agregasının filler malzemesiyle yer değiştirildi. Filler malzemelerinin miktarı agreganın %5'i olarak seçildi. Kül kömürle çalışan enerji santralinden elde edilmiştir. Petrolü sondaj atığı ise petrol kuyularından elde edilmiştir. Lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplama karışımları ve lastik tozu, kül, petrolü sondaj atığı, mermer tozu, kireç ve çimento gibi malzemelerin filler olarak ilave edildiği asfalt beton kaplama karışımları üzerinde marshall stabilite ve akma deneyi, indirek çekme deneyi, serbest basınç deneyi ve su hasarı deneyi yapılmıştır.

Lastik parçaların dane çapı ve miktarı artarken, Marshall stabilite ve hacim özgül ağırlık değerleri azalmıştır. Bununla beraber, lastik parçaları ilave edilen asfalt beton kaplama karışımların boşluk oranı ve akma değerleri ise artmıştır. 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaların %10 oranında ilave edildiği asfalt beton kaplama karışımlarından en iyi indirek çekme değerleri elde edilmiştir. Plastik ilavesi, asfalt beton kaplama karışımların marshall stabilite ve indirek çekme mukavemeti değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Filler malzemesi olarak kullanılan kül asfalt beton kaplama karışımların Marshall stabilite, indirek çekme mukavemeti ve serbest basınç değerlerini önemli ölçüde etkilemezken, petrolü sondaj çamuru asfalt beton kaplama karışımların indirek çekme mukavemetini (konvansiyonel asfalt kaplama karışımların %25'i oranında) azaltmıştır. Marshall stabilitesi, indirek çekme gerilmesi ve serbest basınç gerilmesi deneylerine göre, filler olarak kullanılan malzemeler arasında en iyi sonucu kireç ilavesi vermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplama karışımların tokluk ve elastiklik özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir. Bu şekilde, lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplamalar çatlamalardan korunmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Asfalt Beton Kaplama Karışımları, Atık Malzemeler, Plastik Atıklar, Lastik Parçaları, Kül, Petrolü Sondaj Atığı, Mermer Tozu

ABSTRACT
Master of Science Thesis

**ASSESSMENT OF INDUSTRIAL WASTES ON ASPHALT
CONCRETE PAVEMENT MIXTURES**

ALTAN CETIN

Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program

Supervisor : Assoc.Prof. Mustafa TUNCAN
1997, Page 99

In this study, the effects of industrial wastes such as rubber tire, fly ash, plastics (polyethylene) and petroleum contaminated waste, marble powder on asphalt concrete pavement mixtures were investigated. For this purposes, asphalt cement and aggregate were selected according to Turkish Highway Specifications. Rubber was obtained by copping from scrap vehicle tires. The amounts of crumbed rubber and plastics were chosen 5%, 10% and 20% of total weight of asphalt. Crumbed rubber, fly ash, petroleum contaminated waste, murble powder, lime and cement were replaced by filler material of aggregate. The amounts of filler materials were selected 5% of aggregate. Fly ash was obtained from coal burning power plant. Petroleum contaminated waste was obtained from petroleum drilling wells. Marshall stability, flow test, indirect tensile test unconfined compressive test and water sensitivity test were performed on rubber and plastics mixed asphalt concrete pavement mixtures and filler materials such as crumbed rubber, fly ash, petroleum contaminated waste, murble powder, lime, cement mixed asphalt concrete pavement mixtures.

While the grain size diameter and the amounts of crumbed rubber were increased, the Marshall stability and the volumetric specific gravity values were decreased. However, flow and the void ratio values of crumbed rubber mixed asphalt concrete pavement mixtures were increased. The addition of 10% crumbed rubber which ranges between #4 and #200 gave the best results with respect to indirect tensile strength values of asphalt concrete pavement mixtures. Addition of plastics significantly increased Marshall stability and indirect tensile strength values of asphalt concrete pavement mixtures. While the addition of fly ash used as a filler material did not significantly affect the Marshall stability, indirect tensile strength and unconfined compressive strength values of asphalt concrete pavement mixtures, the addition of petroleum drilling waste decreased the tensile strength values (25% of conventional asphalt concrete pavement mixtures) of asphalt concrete pavement mixtures . Addition of lime as a filler material gave the best results among them with respect to Marshall stability, indirect tensile strength and unconfined compressive strength tests. Results of this study indicated that the properties of toughness, elasticity of crumbed rubber and plastics mixed asphalt concrete pavement mixtures were improved. Therefore, rubber and plastics mixed asphalt concrete pavements were prevented from cracks.

Keywords : Asphalt Concrete Pavement Mixtures, Waste Materials, Plastic Wastes, Crumb Rubber, Fly Ash, Petroleum Conteminated Wastes, Murble Powder

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Mustafa TUNCAN¹ ve Sayın Ahmet TUNCAN¹'a, deneyler hususundaki yardımlarından dolayı Sayın Hüseyin TEMEL²'e ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, Karayolları Genel Müdürlüğü, laboratuvarlarından yararlandığımız Anadolu Üniversitesi, Bilecik Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü'ne ve lastik, plastik, bitüm ve agrega temininde yardımlarından dolayı sırasıyla, Sayın Lastik, Akcan Plastik, Eskişehir Büyükşehir Belediyesi, Asfalt Şantiyesi ve Estaş A.Ş.'ne ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

¹ Doç.Dr. , Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir

² Tekniker, Anadolu Üniversitesi, Bilecik Meslek Yüksekokulu, Bilecik

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	3
1.2. Çalışmanın Özeti	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	
2.1. Lastik Parçaları Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Karışımları	5
2.2. Kül (Fly Ash) Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Karışımları	8
3. ESNEK ÜSTYAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİ	11
3.1. Bitümlü Karışımların Fiziksel ve Mekanik Özellikler	11
3.1.1. Stabilite	12
3.1.2. Fleksibilite (Esneklik)	13
3.1.3. Durabilite (Çevresel dayanıklılık)	13
3.1.4. Kaymaya karşı direnç	14
3.1.5. Yorulmaya karşı direnç	14
3.1.6. Geçirimsizlik	15
3.1.7. İşlenebilirlik	15
3.2. Esnek Üstyapılarda Gerilme Durumu	15
3.2.1. Trafik yüklerinden meydana gelen mekanik gerilmeler	16
3.2.1.1. Bandaj altında esnek üstyapının deformasyonu ve gerilmeler	16
3.2.1.2. Esnek üstyapılarda oluşan gerilmelerin hesaplanması	20
3.2.1.3. İdeal ortamlar içindeki gerilmeler	20
3.2.2. Sıcaklık ve nemden doğan fiziksel gerilmeler	22
3.3. Bitümlü Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar	23
3.3.1. Şekil Değiştirme	24
3.3.2. Çatlama	27
3.3.3. Ayrışmalar	29

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

4. KULLANILAN MALZEMELER.....	31
4.1. Agregası	31
4.2. Bağlayıcı (Asfalt Çimentosu, bitüm).....	33
4.3. Bitümün Yüzdesi Olarak İlave Edilen Malzemeler	33
4.3.1. Lastik parçaları.....	33
4.3.2. Plastik parçaları.....	35
4.4. Filler Malzemesi Olarak İlave Edilen Malzemeler	35
4.4.1. Kül (Fly Ash).....	35
4.4.2. Petrollü sondaj atıkları.....	36
4.4.3. Mermer tozu.....	38
4.4.4. Lastik parçaları.....	39
4.4.5. Portland çimentosu.....	39
4.4.6. Kireç.....	40
5. DENEY METODLARI	41
5.1. Lastik ve Plastik İlaveli Bağlayıcıların Hazırlanması	41
5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	41
5.3. Sıkıştırılmış Kaplama Karışımların Hazırlanma Aşamaları	42
5.3.1. Agreganın özgül ağırlık ve absorpsiyon tayini.....	45
5.3.1.1. Kaba agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlık tayini.....	46
5.3.1.2. İnce agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlık tayini.....	47
5.3.1.3. Mineral filler zahiri özgül ağırlık tayini.....	48
5.3.2. Asfalt çimentosunun özgül ağırlığının tayini.....	49
5.3.3. Agregası karışımının özgül ağırlığının tayini.....	50
5.3.4. Bitümlü kaplama karışımların maksimum teorik özgül ağırlığının tayini.....	51
5.3.5. Sıkıştırılmış bitümlü kaplama karışımların hacim özgül ağırlığının tayini.....	52
5.3.6. Agregası efektif özgül ağırlığının tayini.....	53
5.3.7. Bitüm absorpsiyon yüzdesinin hesaplanması.....	54
5.3.8. Kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması.....	55
5.3.9. Farklı bitüm miktarlarında hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığının tayini.....	55
5.3.10. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki agregalar arası boşluk (VMA) yüzdesi.....	56
5.3.11. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması.....	56
5.4. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	57
5.5. İndirek Çekme Deneyi.....	59
5.6. Serbest Basınç Deneyi.....	59
5.7. Su Hasarı Deneyi.....	62

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

6. DENEY SONUÇLARI.....	64
6.1. Kullanılan Agregaya için Yapılan Marshall Dizayn Sonuçları.....	64
6.1.1. Agregaya ve bitüme ait deney sonuçları.....	64
6.1.2. Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları.....	65
6.2. Lastik ve Plastik Atıkların Etkisinin Araştırılması.....	69
6.2.1. Kullanılan lastik boyutlarının belirlenmesi.....	69
6.2.2. Marshall stabilite ve akma deneyine etkisi.....	72
6.2.3. İndirek çekme deneyine etkisi.....	75
6.2.4. Serbest basınç dayanımına etkisi.....	76
6.2.5. Su hasarı deneyine etkisi.....	78
6.3. Kül, Petrollü Sondaj Atığı, Mermer Tozu, Lastik Tozu, Çimento ve Kireç'in Filler Malzemesi Olarak Kullanıldığı Çalışmanın Sonuçları.....	82
6.3.1. Marshall deneyi sonuçları.....	82
6.3.2. İndirek çekme deneyi sonuçları.....	84
6.3.3. Serbest basınç deneyi sonuçları.....	86
6.3.4. Su hasarı deneyi sonuçları.....	87
6.3.4.1. Marshall deneyi sonuçları.....	87
6.3.4.2. İndirek çekme deneyi sonuçları.....	89
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
8. KAYNAKLAR.....	94
9. EKLER.....	97

EKLER

Ek-1	Agrega ve Bitüm Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları.....	98
Ek-2	Kullanılan Agregaya için Yapılan Marshall Dizayn Sonuçları.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

3.1.	Pnömatik bandaj altında üstyapı yüzeyinin deformasyonu (Umar ve Ağar 1991)	17
3.2.(a)	Tek bandajın etkisi ile asfalt betonu tabakasında meydana gelen gerilmeler ve bandajların hareketiyle gerilmelerde görülen değişiklikler (Umar ve Ağar 1991)	18
3.2.(b)	Çift bandajın etkisi ile asfalt betonu tabakasında meydana gelen gerilmeler ve bandajların hareketiyle gerilmelerde görülen değişiklikler (Umar ve Ağar 1991)	18
3.3.	Üç tabakadan oluşan bir esnek üstyapıda yük eksenine etrafında oluşan düşey ve yatay gerilmeler (Umar ve Ağar 1991)	19
3.4.	Kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altındaki bozulması (Umar ve Ağar 1991)	20
3.5. (a)	Tek tekerleğin yollarda meydana getirdiği düşey gerilme (Umar ve Ağar 1991)	21
3.5. (b)	Çift tekerleğin yollarda meydana getirdiği düşey gerilme (Umar ve Ağar 1991)	21
3.6.	Don kabarması olayının mekanizması	22
4.1.	Agrega ait gronülometri eğrisi	32
4.2.	Lastik parçalarına ait gronülometri eğrisi	34
4.3.	Kül (fly ash)'e ait gronülometri eğrisi	36
4.4.	Petrollü sondaj atığı'na ait gronülometri eğrisi	37
4.5.	Mermer tozu'na ait gronülometri eğrisi	38
4.6.	Portland çimentosu'na ait gronülometri eğrisi	39
4.7.	Sönmüş kireç'e ait gronülometri eğrisi	40
5.1.	Karışım hazırlanmasında kullanılan mikser	43
5.2.	Marshall numune sıkıştırıcı	43
5.3.	Hidrolik numune çıkartıcı	44
5.4.	Hacim özgül ağırlığının belirlenmesi için gerekli aletler	44
5.5.	Agrega danesinin farklı özgül ağırlıkları arasındaki ilişki	45
5.6.	Su banyosunda bekletilen bitüm numuneleri	50
5.7.	Gevşek kaplama karışıma vakum uygulanması	52
5.8.	Marshall deney aleti	58
5.9.	Su banyosunda bekletilen Marshall briketleri	60

5.10.	İndirek çekme deney düzeneği	60
5.11.	Serbest basınç dayanımının belirlendiği deney aleti	61
5.12.	Desikatördeki numunelere vakum uygulanması	63
5.13.	Su hasarı deneyinde kullanılan derin dondurucu	63
6.1.	Agrega için marshall dizayn grafikleri	
6.1.(a)	Hacim özgül ağırlığının bitüm yüzdesi ile değişimi	66
6.1.(b)	Asfaltla dolu boşluğun bitüm yüzdesi ile değişimi	66
6.1.(c)	Boşluğun bitüm yüzdesi ile değişimi	67
6.1.(d)	Marshall stabilitesinin bitüm yüzdesi ile değişimi	67
6.1.(e)	Akmanın bitüm yüzdesi ile değişimi	68
6.1.(f)	VMA'nın bitüm yüzdesi ile değişimi	68
6.2.	Hacim özgül ağırlığının lastik boyutu ile değişimi	70
6.3.	Boşluğun lastik boyutu ile değişimi	70
6.4.	Marshall stabilitesinin lastik boyutu ile değişimi	71
6.5.	Akmanın lastik boyutu ile değişimi	71
6.6.	Marshall stabilitesinin lastik ve plastik miktarı ile değişimi	73
6.7.	Akmanın lastik ve plastik miktarı ile değişimi	73
6.8.	Hacim özgül ağırlığın lastik ve plastik miktarı ile değişimi	74
6.9.	Boşluğun lastik ve plastik miktarı ile değişimi	74
6.10.	İndirek çekme gerilmesinin lastik ve plastik miktarı ile değişimi	76
6.11.	Serbest basınç gerilmesinin lastik ve plastik miktarı ile değişimi	77
6.12.	Lastikli (4-200 nolu) numunelerinin σ - ϵ eğrileri	78
6.13.	Lastik ve plastik içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait indirek çekme dayanımları	80
6.14.	Lastik ve plastik içeren numunelere ait koşullu/koşulsuz indirek çekme dayanımları	80
6.15.	Lastik ve plastik içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait Marshall stabilite değerleri	81
6.16.	Lastik ve plastik içeren numunelere ait koşullu/koşulsuz Marshall stabilite değerleri	81

6.17.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait hacim özgül ağırlıkları	83
6.18.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait akma değerleri	83
6.19.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait Marshall stabilitesi değerleri	84
6.20.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait indirek çekme değerleri	85
6.21.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait serbest basınç gerilmeleri	87
6.22.	Farklı filler malzemeleri içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait Marshall stabilite değerleri	88
6.23.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait koşullu/koşulsuz Marshall stabilite değerleri	88
6.24.	Farklı filler malzemeleri içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait indirek çekme gerilmesi değerleri	89
6.25.	Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait koşullu/koşulsuz indirek çekme gerilmesi değerleri	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

4.1. Agrega gradasyon değerleri	31
4.2. Agregaların yoğunlukları ve su emme miktarları	31
4.3. Kaba agreganın bazı fiziksel özellikleri	32
4.4. Asfalt çimentosunun bazı fiziksel özellikleri	33
4.5. Kullanılan lastik parçaların gradasyon değerleri	34
4.6. Petrollü sondaj atıklarına ait bazı özellikler	37
6.1. Agrega ve bitüme ait deney sonuçları	64
6.2. Optimum bitümdeki Marshall deney sonuçları	65
6.3. Farklı boyutlardaki lastik parçalarının Marshall stabilite değerleri	69
6.4. Lastik ve plastik ilaveli numunelere ait Marshall stabilite değerleri	72
6.5. Lastik ve plastik ilaveli numunelere ait indirek çekme gerilmesi değerleri	75
6.6. 4-20 nolu lastik ilaveli numunelere ait serbest basınç dayanımları	77
6.7. Lastik ve plastik içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait Marshall stabilite değerleri	79
6.8. Lastik ve plastik içeren koşullu ve koşulsuz numunelere ait indirek çekme değerleri	79
6.9. Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait Marshall stabilite değerleri	82
6.10 Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait indirek çekme değerleri	85
6.11. Farklı filler malzemeleri içeren numunelere ait serbest basınç gerilmeleri	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Piknometre ağırlığı (g)
a_t	: Tekerlek iz genişliğinin yarısı
A_f	: Piknometre ağırlığı (g)
A_i	: Piknometre ağırlığı (g)
A_k	: Kuru numune ağırlığı (g)
A_t	: Piknometrenin boş ağırlığı (g)
b	: Piknometre+su ağırlığı (g)
B	: Doymun-yüzey kuru numune ağırlığı (g)
B_f	: Piknometre+su ağırlığı (g)
B_i	: 25 °C'deki su dolu piknometre ağırlığı (g)
B_k	: Doymun-yüzey kuru numune ağırlığı (g)
B_t	: 25 °C'deki su dolu piknometre ağırlığı (g)
c	: Piknometre+bitüm ağırlığı (g)
C	: Numunenin sudaki ağırlığı (g)
C_f	: Piknometre+kuru numune ağırlığı (g)
C_i	: Piknometre ve doymun-yüzey kuru numune ağırlığı (g)
C_k	: Doymun-yüzey kuru numunenin sudaki ağırlığı (g)
C_t	: Piknometre+numune ağırlığı (g)
d	: Piknometre+bitüm+su ağırlığı (g)
d_t	: Tekerler arası mesafe
D	: Numune çapı (cm)
D_T	: Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı
D_f	: Piknometre+kuru numune+su ağırlığı (g)
D_i	: 25 °C'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g)
D_p	: Sıkıştırılmış karışımın (briketin) hacim özgül ağırlığı
D_t	: 25 °C'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g)
E_i	: Kuru numune ağırlığı (g)
%F	: Fillerin ağırlıkça yüzdesi
G_b	: Bitüm özgül ağırlığı
G_{ef}	: Agregat efektif özgül ağırlığı
G_{fa}	: Fillerin zahiri özgül ağırlığı
G_{ia}	: İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı
G_{ib}	: İnce agreganın hacim özgül ağırlığı
G_{ka}	: Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı
G_{kb}	: Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı
G_{sa}	: Agregat karışımının zahiri özgül ağırlığı
G_{sb}	: Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı
G_{se}	: Efektif özgül ağırlık
%İ	: İnce agreganın ağırlıkça yüzdesi
%K	: Kaba agreganın ağırlıkça yüzdesi
P	: Maksimum yük (kg)
P_{ba}	: Absorbe edilen bitüm

P_{be}	: Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı
S	: Gerilmenin etki mesafesinin yarısı (m)
S_t	: İndirek çekme gerilmesi (kg/cm ²)
S₁	: Koşulsuz grubun ortalama çekme dayanımı (kg/cm ²)
S₂	: Koşullu grubun ortalama çekme dayanımı (kg/cm ²)
t	: Numune kalınlığı (cm)
V_{ap}	: Asfaltı absorbe eden boşluklar hacmi
V_f	: Asfaltla dolu boşluk
V_h	: Toplam hacim yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu
V_{ip}	: Geçirimsiz boşluklar hacmi
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
V_s	: Katı hacmi
V_{pp}	: Su geçirimli boşluklar hacmi
W_a	: Agreganın yüzdesi olarak bitüm
W_s	: Agreganın kuru ağırlığı
σ_t	: Yatay gerilme
σ_z	: Düşey gerilme
γ_w	: Suyun yoğunluğu (g/cm ³)

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CRM	: Crumb Rubber Modified
ASTM	: American Society of Testing and Materials
IRM	: Iron Rich Material
VMA	: Agregalar arası boşluk
CMC	: Carboxy Methly Cellulose
PSA	: Petrollü Sondaj Atığı
AC	: Asphalt Cement
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	: American Society of Civil Engineering
TRB	: Transportation Research Board

1. GİRİŞ

Günümüzde atık kontrolündeki en büyük problemlerden birisi de atıkların gündün güne artması ve ciddi boyutlarda çevre sağlığını tehdit etmesidir. Bir çok ülkenin karşı karşıya kaldığı bu sorun son yıllarda sayıları artan çevresel kuruluşları çözüm aramaya zorlamaktadır. Atıkların yakılması ve ya düzenli deponi alanları oluşturularak gömülmesi en çok uygulanan yöntemlerdir. Atıkların değerlendirilmesi, en cazip yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, kullanılmış otomobil lastiği, poşet, bidon ve şişe v.b. polietilen esaslı plastik atıklar, kömür ile çalışan termik santrallerin atığı olan kül (fly ash) ve petrol arama çalışmalarında ortaya çıkan petrolü sondaj çamuru gibi atıklar kullanılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) her yıl 240 milyon adet üzerinde araba lastiği, 45 milyon adet üzerinde kamyon lastiği birikmektedir ve ayrıca, yılda 188 milyon atık lastik depolanmaktadır. Bu sebeple, Çevre Koruma Ajansı tarafından kurulan ve yaklaşık 2 ile 3 milyon kapasiteli lastik stok alanları yetersiz kalmaktadır. 1980 yılının ortalarına kadar bu lastiklerin yakılması yoluna gidilmiş, fakat bunun sonucunda ortaya çıkan yağ ve kurum, hava, su ve zemin kirliliği meydana getirmiştir. ABD' de ortaya çıkan bu lastik birikimini eritmek için alternatif çareler düşünülmüş ve parçalanmış kullanılmış araba lastiklerin yol dolgularında, kaplama alt malzemesi olarak, dalgakıranlar, istinad duvarları, çarpma bariyerlerinde hafif agrega olarak ve sıcak karışım asfalt kaplamalarında modifiye malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır [1].

Türkiye'de 1988-1994 yılları arasında yurtiçi lastik talebinin yıllık ortalama %5,8 civarında artış göstereceği ve yeni lastik talebinin 7,5 milyon adete yükseleceği tahmin edilmiştir [2]. Ülkemizde kullanılmış lastiklerin büyük bir kısmı yenilenmektedir. Atık durumunda olan lastikler ise, ülkemizde %11 oranında bir paya sahip olan rejenere kauçuk imalinde kullanılmaktadır [3]. Rejenere kauçuk sanayisi atık lastik birikimini engellemektedir. Ülkemizde gerek ihtiyacın azlığı ve gerekse rejenere kauçuk üretiminde değerlendirilmesinden dolayı atık lastik miktarı çevre sağlığını tehdit edecek boyutlara ulaşmamıştır. Fakat, Türkiye'de son yıllarda otomobil üretiminin artması ve rejenere

lastiğe gösterilen talebin azalmasıyla ülkemizin, ABD'nin karşılaştığı sorunlarla karşılaşabileceği unutulmamalıdır.

Plastik malzemeler yaşantımızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Avrupa genelinde katı atıkların %5 ile %9'unu plastik atıklar oluşturmaktadır. Avrupa birliğine bağlı ülkeler 1980-1989 yılları arasında %35'ten %78'e varan tüketim artışını rapor etmişlerdir. Atıkların enerji dönüşümlü olan kontrollü yakma ile imhaları söz konusu ise de, genellikle gömülmektedir. Kullanım sonrası plastik atıklar tüm plastik atıkların %92'sini oluşturmaktadır. Bu kullanım sonrası atıkların %8'i geri dönüşümde kullanılmakta ve %17'si kontrollü olarak yakılmaktadır [4].

Kömürle çalışan termik santrallerde, kömürün yanması sonucu atık olarak ortaya çıkan kül (fly ash) zemin stabilizasyonunda, tuğla ve çimento imali gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Amerika'da termik santrallerden yılda 82 milyon ton, Kanada'da yılda 4 milyon ton kül ortaya çıkmaktadır [5]. Ülkemizde de ortaya çıkan kül miktarı oldukça fazladır. Sadece, Seyitömer Termik Santralinde yılda 1 milyon ton atık kül birikmektedir. Bu atıkların ülkemizde değerlendirilme oranı oldukça düşük olduğundan, atık küller çeşitli bölgelerde oluşturulan kül göllerinde depolanmaktadır.

Özellikle 1980'lerden bu yana birçok mühendis ve araştırmacının ilgisini çeken diğer bir konu ise, petrol kirliliğidir. Ülkemizde son yıllarda hız kazanan petrol arama çalışmaları sırasında ortaya çıkan petrolü sondaj atıkları çevre kirliliği oluşturmaktadır. Zeminde açılan ve mud-pit adı verilen çamur havuzlarında toplanan bu atık, zemini ve yeraltı suyunu kirleten bir faktör olabilmektedir. Bu atık malzemenin yerinde stabilizasyonu ve yol yapımında stabilize malzeme olarak kullanılması alanında çalışmalar yapılmaktadır [6].

Günümüzde atıkların değerlendirilmesi en cazip uygulamalardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yol yapımı, atıkların değerlendirildiği alanların başında gelmektedir. Böylelikle, hem atıkların oluşturacağı çevre kirliliği önlenmekte ve hem de bu atıklar kullanılarak yolların bazı özellikleri iyileştirilmektedir. Ayrıca, atıkların değerlendirilmesiyle ülke ekonomisine de katkıda bulunmaktadır.

1.1. Amaç

Ülkemizde imal edilen asfalt beton kaplamaların performansı oldukça düşük ve kullanım ömrü kısadır. Asfalt kaplamalar üzerinde yapımdan kısa bir süre sonra çatlak ve deformasyonlar meydana gelmekte ve bunların giderilmesi oldukça masraflı olmaktadır. Sıcak havalarda bitümlü tabakaların dinamik sertliği azalmakta ve böylece alt tabakalara yüksek gerilmeler aktarılmaktadır. Yollarda meydana gelen bu çatlak ve deformasyonlar yeterli kalitede malzeme kullanılmaması, yol alt yapısının ve üst yapının standartlara uygun inşaa edilememesi veya yol ulaşımına açıldıktan sonra taşıtların belirlenen yük sınırını aşmaları ve yol bakımlarının yeterince iyi yapılamaması gibi nedenlere bağlanabilir. Bu sebeplerle, asfalt yol kaplamaların stabilite, esneklik, çekme mukavemeti su hasarı direnci gibi bazı özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Bunun içinde takviye malzemesi olarak, ülkemiz ve diğer ülkeler için çevre kirliliği meydana getiren veya ileride karşımıza çevresel sorun oluşturacak kullanılmış otomobil lastikleri, plastik atıklar, kül ve petrolü sondaj atıkları kullanılmıştır.

Kullanılmış otomobil lastik parçaların yol kaplamalarında değerlendirilmesine literatürde rastlanmaktadır. Lastik parçaları ilave edilen kaplamaların, mevcut asfalt beton kaplamalarına göre daha elastik olduğu ve don kabarması sonucunda oluşan çatlakların en aza indirildiği, sıcaklık etkisiyle kaplamada oluşan yumuşamanın ve genleşmenin minimuma indiği ve kaplama bozulmasının önlediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, normal asfalt kaplamasından daha az kalınlık ve maliyette imal edilebilmektedir [7, 8, 9].

Yaşantımızın vazgeçilmez bir parçası olan plastik ürünlerin doğal olarak yok olması çok uzun zaman almakta ve çevre sağlığını tehdit etmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada polietilen esaslı plastik atıklar da kullanılmıştır.

Çevre kirliliği teşkil eden kül, asfalt kaplama karışımlarında mineral filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Kül ilave edilen karışımların stabilitesinin arttığı belirtilmektedir [5].

Bu çalışmada, bazı endüstriyel atıkların, asfalt beton kaplamasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Asfalt kaplamaların bazı özelliklerinin iyileştirilmesine ve bu atıkların değerlendirilerek, çevre sağlığına ve ülke ekonomisine katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip atıkların asfalt betonu-aşınma tabakasındaki fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Kullanılan atıkların özellikleri açısından çalışmayı iki bölüme ayırmak mümkündür. Birinci bölümde, otomobil lastik atıkları ve polietilen esaslı plastik atıklar, bitüm miktarının %5, %10, ve %20'sinde ilave malzeme olarak kullanılmıştır. İkinci bölümde ise, endüstriyel atıklar olan kül, petrolü sondaj atıkları ve lastik tozları ile mermer tozu, çimento ve kireç filler olarak kullanılmıştır. Çalışmada, tek tip kırmataş agrega ve 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu (bitüm, bağlayıcı) kullanılmıştır. Marshall kompaktörü kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite, indirek çekme dayanımı, serbest basınç dayanımı ve su hasarı deneyleri yapılmıştır.

Çalışmada, agrega ve bitüm için Marshall metodu kullanılarak, sıcak karışım kaplama dizaynı yapılmış ve optimum bitüm muhtevası %4,5 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde, optimum bitüm muhtevasında çalışılmıştır.

Birinci bölümde, 4-20, 20-200 ve 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları ve 4-10 nolu elek boyutundaki plastik parçaları bitüm (asfalt) ağırlığının %5'i, %10'u ve %20'si olarak asfalt çimentosu (bağlayıcı) ile karıştırılmıştır. Deney numuneleri (Marshall briketleri), önceden hazırlanan lastikli ve plastikli bağlayıcılar ile %4,5 optimum bitüm muhtevasında, herbir karışım grubu için 3 adet olarak hazırlanmıştır.

İkinci bölümde ise, kül, petrolü sondaj atıkları ve lastik tozları mineral filler olarak kullanılmıştır. Bu bölümde ayrıca Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnamesinde mineral filler olarak kullanılabileceği belirtilen mermer tozu, kireç ve portland çimentosu da kullanılmıştır. Bahsedilen bu malzemelerin 200 nolu elek altında kalan kısımları, agrega harmanının %5'i oranında taştuzu ile yer değiştirilmiştir. Yalnız lastik tozlarının 100-200 nolu elekler arasında kalan kısmı kullanılmıştır. Bu bölümde, numuneler (Marshall briketleri), %4,5 optimum bitüm muhtevasında hazırlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Lastik Parçaları Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Karışımları

Kullanılmış otomobil lastikleri, asfalt kaplama karışımların iyileştirilmesi için yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar, hurda lastiklerin öğütülebileceğini ve yüksek özellikli bir malzeme elde etmek için sıcak asfalt ile karıştırılabileceğini göstermiştir.

Heitzman [9] Brookfield Vizkozite deneyi ile 90 dakikalık bir karıştırma zamanından sonra elde edilen, lastik parçalarıyla güçlendirilmiş AC-20 asfalt çimentosunun bazı fiziksel özelliklerini belirlemiştir. 80 nolu elekten geçen lastik parçaları asfalt miktarının %0-21'i arasında ilave edilmiştir. 176⁰C'de %21 oranında lastik ilavesi yapılan karışımların kontrol karışımlarına (%) göre vizkozitesi 100 kat artmıştır.

McDonald [10] 85-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun içerisine bağlayıcının %33'ü oranında devulkanize (lastiğin yeniden kükürtle sertleştirilmiş hali) edilmiş lastik kullanmıştır. Lastik parçaları ilave edilmiş asfalt 215 ⁰C'ye kadar ısıtılıp, jel kıvamı elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.

Morris and McDonald [11] ufalanmış ve ısı ile yumuşatılmış araba lastiklerin bitüm ağırlığının %25'i ve daha fazla miktarlarında lastik parçalarının asfalt içerisinde kullanımını önermişlerdir. Lastik atıklar, ABD'de yaygın olarak kullanılmakta ve üst tabakada oluşacak çatlakları önlemektedir. Asfalt içerisine %20 oranında lastik ilavesiyle elde edilen karışım normalde, sızdırmaz parçacıklı yüzey tadilatı olarak kullanılmaktadır.

Schnormeier [12] 1969-1974 yılları arasında biriktirilen asfalt-lastik karışımların Arizona Phonex'te, asfalt kaplama üzerinde çalışmıştır. Asfalt-lastik kaplamalarında iki metod kullanılmıştır. McDonald yönteminde, %25 oranında öğütülmüş araba lastiği sıcak asfalt ile karıştırılarak, gazyağı veya benzin ile sulandırıldı. Arizona Rafineri Yönteminde ise, %18 ile %22 arasında öğütülmüş lastik yalnız asfalt ile karıştırılmış, sonra bağlayıcının işlenebilirliğini arttırmak için gazyağı ile sulandırılmıştır. Schnormeier, yüksek mühendislik özelliklerine sahip olan lastikli asfalt bağlayıcıların viskozitesinin dikkate değer ölçüde arttığını belirtmiştir. Asfalt-lastik karışımların çatlak dolgusu olarak da kullanılması tavsiye edilmektedir.

Lalwani at al. [13] 50 nolu (300 μ m) ile 30 nolu (600 μ m) elek altına geçen iki ayrı dane çapına sahip lastik parçalarını kullanarak lastikli asfalt üzerinde bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma sonucunda, lastik miktarındaki artışın bağlayıcının ısı hassasiyetini düşürdüğünü, fakat 25 °C'de tokluğunu (birim hacimdeki malzemeyi kırmak için gerekli enerji) arttırdığını belirtmiştir.

Robert and Lytton [14] esnek hava alanı kaplamalarında asfalt-lastik bağlayıcılarını kullandıkları bir karışım dizaynı yapmışlardır. Bu çalışmada, kullanılmış araba lastiklerin öğütülmesiyle elde edilen lastik parçalarının ilave edildiği iki tip asfalt-lastik karışımı kullanılmıştır. A tipi karışım %25, B tipi karışım ise %18 oranında lastik parçalarını içermektedir. Hazırlanan marshall numunelerinde bu iki tip malzeme kullanılmış ve başarılı bir karışım elde edilmiştir. Aynı oranda bağlayıcı içeren lastiksiz karışımlarla karşılaştırıldığında elde edilen stabilitenin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Lougheed and Papagiannakis [1] lastik ilave edilmiş asfaltın viskozite özelliklerini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, içerisine lastik ilave edilen CRM (Crumb Rubber Modified) asfalt beton kaplamalar üzerinde çalışılmış ve Brookfield Viskozite deneyi ile lastik parçaları ilave edilen asfalt çimentosunun viskozite değerleri belirlenmiştir. Karışıma lastik parçaların ilave edilmesi iki yöntemle yapılmıştır. Bu çalışmada, lastik parçaların bitüm ile önceden karıştırıldığı ıslak yöntem tercih edilmiştir. Bağlayıcının viskozite değerleri bağlayıcı tipine, lastik tipine, karışım sıcaklığına ve karışım enerjisine bağlı olarak azalmaktadır. CRM bağlayıcıların Brookfield Viskozite deneyi ASTM D 2196-86 ve ASTM D 4402-87 standartlarına göre yapılmıştır. Bu çalışmada AC-5, AC-10, ve AC-20 olmak üzere üç tip bağlayıcı kullanılmıştır. 80 nolu elekten geçen lastik parçaları bağlayıcı miktarının %0'ı, %3'ü, %5'i, %7'si, %12'si ve %18'i oranlarında denenmiştir. CRM asfalt karışımının viskozitesi, lastik parçaların ısı bağlayıcının ısısına ulaştığı andan itibaren azalmıştır. Karışımın viskozite değerine ulaşması yaklaşık 30-40 dakika sürmüştür. Bu viskozite değerine stabil olmuş viskozite ismi verilmiştir. CRM yüzdesinin artmasıyla, deneylerden elde edilen viskozite değerlerinde zamanla bir artış görülmüştür. Bu çalışma, asfalt kaplama malzemeleri içine lastik parçalarının en başarılı şekilde karıştırılma yönteminin ıslak yöntem olduğunun bir göstergesidir.

Lastik ilavesiyle elde edilen viskozite değerlerinin lastiksiz numunelere oranı aşağıdaki gibidir.

Lastik Miktarı (%)	Lastikli / Lastiksiz Bitüm Viskozitesi
3	1.3
5	1.5
7	1.8
12	3.4
18	12

Pamukçu [15] IRM-lastik (Iron Rich Material) asfalt kaplama karışımların performansını incelemiştir. IRM (demir açısından zengin malzeme) lastikli asfalt karışımları seçilerek basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Bu karışım numunelerin aynı agrega ve bitüm oranlarında hazırlanan kuvars agrega-asfalt ve IRM-asfalt numunelerinden daha fazla yoğunluğa ve basınç mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. 10 nolu ve 20 nolu eleklerden geçen lastik parçaları kullanılarak hazırlanan karışımlar %8 bitüm, %5 lastik parçası ve %87 agrega içermektedir. Test edilen bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen sonuçlara göre, genel olarak eksenel şekil değiştirme %0,3'den %0,5'e artmış ve elastik sertlik 30 psi'den 27 psi'ye düşmüştür. Bu değişimler malzemenin tokluğunun ve esnekliğinin arttığını göstermektedir.

Al-Abdul-Wahhab and Al-Amri [7] rejenere lastik ilave edilen asfalt beton kaplama karışımlarının özelliklerini belirlemek için bir laboratuvar çalışması yapmıştir. Yapılan bu çalışmanın amacı, lastik parçaların asfalt beton kaplama karışımları üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Lastik parçaları bağlayıcı miktarının %10'u, %20'si ve %30'u ile agrega miktarının ağırlıkça %3'ü olarak ilave edilmiştir. Lastik ilave edilen bağlayıcılar ve optimum marshall numuneleri üzerinde bazı fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştir. Bağlayıcılar üzerinde, yumuşama noktası ve viskozite deneyi; kaplama karışım numuneleri üzerinde ise Marshall ve Hveem Stabilitesi gibi statik deneyler, dolaylı çekme mukavemeti ve sünme deneyleri 25 ve 45 °C'de yorulma davranışı ve elastisite modülünün belirlenmesi gibi dinamik deneyler yapılmıştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, lastik miktarının artmasıyla yumuşama noktası ve viskozitenin arttığını, diğer

taftan kaplama karışımlarından elde edilen deney sonuçlarından %10'un üzerindeki lastik ilaveli numunelerde iyileşme olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar, kaplama karışımların performansındaki iyileşme açısından ümit verici olarak nitelendirilmiştir.

Stroup-Gardiner [16] asfalt-lastik parçaları etkileşimini incelemişlerdir. Bu çalışma, lastik miktarının, lastik tipinin ve lastiğin işlenmesinin asfalt lastik karışımları üzerindeki etkisini belirlemek için üç ayrı deney grubundan oluşmuştur. Bu çalışmada, yolcu taşıma ve endüstriyel araçların lastikleri kullanılmıştır. Kullanılan lastik parçaları bağlayıcı ağırlığının %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si olarak ilave edilmiştir. Lastik ilave edilen bağlayıcıların viskoziteleri, Brookfield Viskozite aleti kullanılarak ölçülmüştür. Düşük penetrasyonlu bir asfalt çimentosu her iki tip lastikle de daha çabuk reaksiyona girmiştir.

2.2. Kül (Fly Ash) Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Karışımları

Literatürde, külün asfalt karışımları içerisinde filler malzemesi olarak kullanılması ile ilgili çalışmalara rastlamak mümkündür.

Ali et al. [5] kül ilave edilen asfalt karışımların mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada, %5'lik bağlayıcı yüzdesinde 4 farklı kül içeriğine sahip karışımlar değerlendirilmiştir. Bu karışımlar üzerinde yapılan elastisite modülü, sünme, kalıcı deformasyon ve yorulma gibi mekanik özellikler 0, 20 ve 40 °C'de olmak üzere üç sıcaklıkta belirlenmiştir. Soyulma potansiyelinin belirlenmesi için yorulma etkileri test edilmiştir. Yapılan bu çalışma filler olarak kullanılan külün mukavemet ve soyulma direncini iyileştirdiğini göstermiştir. Mekanik özellikler ve su hasarı deneyleri, düşük ve yüksek sıcaklıktaki elastisite modülünün agrega miktarının %2'si oranında kül kullanımıyla iyileştiğini göstermiştir. Külün asfalt kaplama karışımlarında kullanılmasının herhangi bir tehlikesine rastlanmamış kaplamaların tekerlek izi derinliği azalmış, dolayısıyla beklenen hizmet süresi gibi yolun bazı özellikleri iyileştirilmiştir.

Zimmer [17] külün karbon içeriğinin asfalt karışımları üzerindeki etkilerini araştırmış ve kül ilave edilen asfalt beton karışım numunelerin suda bekletildikten sonraki dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Henning [18] C sınıfı külün asfalt karışım numunelerine etkilerini araştırmıştır. Bu çalışma sonunda %4 kül ilavesiyle en yüksek stabilite ile en düşük hava boşluğuna sahip numuneler elde edilmiştir. Suda bekletilen numunelerin stabilitesinin iyileştiğini belirtmektedir.

Sankaran and Rao [19] kül, kaolinit kili ve diğer toz halindeki katkıları filler malzemesi olarak kullanmışlardır. %2 kül ilavesinin stabiliteyi arttırdığını tespit etmişlerdir. %2 kül, %5 asfalt ve %6 kül ve %4 asfalt karışımlarının suda bekletildikten sonraki dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür.

Rosner et al. [20] kül ilave edilen numunelerin dayanımının çok daha iyi olduğunu belirtmiştir. %3-6 arasında kül ilave edilen karışımların soyulmaya karşı kullanılan diğer katkılara nazaran, su zararlarına karşı daha iyi bir dayanıma sahip olduğunu söylemişlerdir.

Suheibani [21] külü asfalt genişletirici olarak değerlendirmiştir. Asfaltın viskozitesine etkili olan kül boyutu, bir genişletirici olarak külün hacim ağırlık ölçümlerini ve asfaltın mekanik özelliklerini ortaya koymuştur. Bu çalışma da en etkili kül boyutu 1-44 µm arasında belirlenmiştir. Bu boyutlardaki kül birim hacim ağırlığında en büyük artışı sağlarken, viskozite ve boşluk üzerinde en az etkiye sahiptir. Elastisite modülü, endirek çekme gerilmesi ve sünme deneylerinin sonucunda F sınıfı kül ilavesinin daha iyi bir çekme mukavemeti, tekerlek izi direnci ve yorulma özelliği kazandırmaktadır.

Tons [22] asfalt genişletirici olarak F sınıfı külün kullanımını araştırmıştır. Asfalt çimentosuyla kül çeşitli yüzdelerde yer değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde tekerlek izi direnci, termal çatlama potansiyeli, yorulma davranışı ve su hasarlarına karşı dayanımın belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Asfalt karışımların bazılarında asfalt çimentosunun %30'unda kül kullanıldığı zaman çekme mukavemeti, yorulma davranışı ve tekerlek izi direncinde dikkate değer iyileşmeler saptanmıştır. Külün miktarının artması agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) ve hava boşluğunun azalmasına sebep olmuştur. Fakat, bu değişimler kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Cross and Fager [23] Kansas'ta kül ilaveli soğuk yerleşim asfalt karışımların termal çatlamalara karşı başarılı ve maliyet açısından uygun olduğunu belirtmiştir. Kül kullanıldığında su hasarına karşı daha hassas ve sert karışımlar elde edildiği belirtmiştir.

C sınıfı kül kullanılmasıyla düzenlenen karışımların geçirgenliği, sertlik ve basınç mukavemetleri artmaktadır. Kül içeren asfalt karışım numunelerinde çok az tekerlek izi ve çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir.

Mazlumdar and Rao [24] Kum-Asfalt-Sülfür kaplama karışımların mühendislik özelliklerine külün etkisini incelemiştir. Kum-Asfalt-Sülfür karışımları asfalt betonu karışımlarına alternatif olarak düşünülmüştür. Kum-Asfalt-Sülfür karışımların, yüksek hava boşluğu içermesi dezavantaj olarak nitelendirilmiştir. Bu çalışmada, %80, %82 ve %85 olmak üzere üç tip agrega yüzdesi ile %5, %7 ve %10 oranında kül kullanılmıştır. Bütün karışımlar marshall stabilite testine tabi tutulmuştur. Bunlar arasından seçilen bazı karışımların statik çekme ve eğilme özellikleri tespit edilmiştir. Kül ilavesiyle marshall stabilite değeri, çekme ve eğilme mukavemetleri artmış, boşluk yüzdesi iyileşmiş ve eğilme deneyinden elde edilen yorulma süreci önemli ölçüde artmıştır.

3. ESNEK ÜSTYAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİ ¹

Bitümlü kaplamaları karışım tipi kaplamalar ve sathi (yüzeysel) kaplamalar olarak iki genel sınıfa ayırmak mümkündür. Kullanım amacı ve beklenen özellikler açısından sathi kaplamalarla karışım tipi kaplamalar büyük farklılıklar gösterir. Sathi kaplamaların herhangi bir yük taşıma özellikleri yoktur. Karışım tipi kaplamaların ise en önemli işlevlerinden birisi trafik yüklerini almak ve üst yapıyı bozulmalardan korumaktır.

Sathi kaplamalar sadece az trafikli yollarda kullanılır. Oysa karışım tipi kaplamalar orta ve ağır trafikli yollarda ve otoyollarda çok yaygın olarak kullanılır ve sathi kaplamalara göre çok daha pahalıdır.

Sıcak-karışım asfalt kaplama, sıcak agregası karışımının yine ısıtılmış asfalt çimentosuyla homojen olarak karıştırılıp kaplanması ile elde edilir. Agregaların kurutulması, asfalt ile karıştırılabilmesi ve işlenebilmesi için gerekli asfalt akışkanlığının sağlanabilmesi için hem agregası ve hem de asfalt 150-160 °C'ye kadar ısıtılır. Bu nedenle bu tür karışımlara sıcak karışımlar denir.

Bitümlü karışımlardan 2 cm kalınlıklı ince kaplama tabakaları yapıldığı gibi 10 cm kalınlığında kaplama yapılması da mümkündür. Ancak, 5-6 cm'den daha kalın yapılması düşünülen kaplamalar iki ayrı tabaka halinde yapılmalıdır. Altteki tabaka genellikle daha az sıkıştırılan ve daha az bağlayıcı (bitümlü) olan "binder" tabakasıdır. Üstteki tabaka ise iyi sıkıştırılan ve bağlayıcısı binder tabakasına göre daha fazla olan "aşınma" tabakasıdır.

3.1. Bitümlü Karışımların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Agregası-asfalt karışımların yol kaplaması olarak kullanılabilmesi için bazı belirli koşulları sağlaması gerekir. Karışımların tasarlanması sırasında aşağıdaki özellikler dikkate alınır.

¹ Bu bölüm aşağıdaki kaynaklardan yararlanılarak hazırlanmıştır.

- Umar ve Açar, 1991
- Önal ve Kahramangil, 1993

3.1.1. Stabilite

Asfalt kaplamaların stabilitesi taşıtlardan gelen sürekli ve uzun süreli statik yükler, hızlanan veya yavaşlayan taşıtların tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti ve sökülmeye karşı gösterdiği dirençtir. Stabiliteyi, kısaca trafik yüklerine karşı ötelenme ve tekerlek izleri oluşmayacak şekilde direnç gösterme yeteneğidir. Stabilite, trafik yüklerini karşılayacak değerde olmalıdır. Ancak çok yüksek stabilite, çok sert bir karışım anlamına gelir ki bu tür kaplamalar trafik yükleri altında oluşan deformasyona uyamayıp çatlar. Bu nedenle düşük stabilite gibi çok yüksek stabilite de zararlıdır.

Stabilite, agregalar arası içsel sürtünmeye ve bitüm-agrega kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arası içsel sürtünme agregada danesinin şekli ve yüzey yapısına kohezyon ise, asfaltın yapışma özelliğine bağlıdır. Kohezyon yükleme hızı ile asfaltın viskozitesi arttıkça ve kaplama ısısı azaldıkça artar. Ayrıca, asfalt yüzdesinin bir noktaya kadar azalmasıyla kohezyon artar. Ancak bitüm tabakasının kalınlığı daha fazla arttığında, içsel sürtünme ile birlikte stabilite de azalır.

Stabilite yetersizliği yolda çökme, ondülasyon ve akmalara yol açar. Üst yapı projelendirilmesi açısından bitümlü karışımın en önemli özelliği stabilitedir.

- Yüksek asfalt yüzdesi oluklaşma, tekerlek izinde oturma ve kumaya,
- Fazla kum yüzdesi sıkıştırma sırasında ve inşaat sonrasında yumuşaklık ve sıkıştırma zorluğuna,
- Agreganın kırılmamış veya az kırılmış, yuvarlak bir yüzeye sahip olması ise tekerlek izinde oturmaya sebep olmaktadır.

3.1.2. Esneklik (Fleksibilite)

Yolun alt tabakasındaki çökmelerden, bitümlü tabakalara geçecek genel deformasyona bitümlü tabakaların çatlama karşı koyabilme yeteneğidir. Esneklik yetersizliği yol yüzeyinde çatlamalara yol açar. Mineral filler ve asfalt çimentosu oranı, asfalt çimentosunun kıvamı, duktilitesi ve sıcaklığa karşı duyarlılığı esnekliğe tesir etmektedir. Bitüm yüzdesi yüksek karışımlar bitüm yüzdesi düşük karışımlara göre daha

esnektir. Ancak bazen, esnekliği yüksek karışımların stabilitesi düşük olabilir. Kararlı ve esnek bir bitümlü karışım elde edebilmek için yazın kıvamını koruyabilen kışın ise kırılğan hale gelmeyen ve yorulmaya karşı dayanıklı bir bağlayıcı gereklidir.

3.1.3. Durabilite (Çevresel dayanıklılık)

Bir bitümlü kaplamanın çevresel dayanıklılığı trafik, su, hava ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı gösterdiği dirençtir. Bütün bunlara ek olarak bir bitümlü karışımın trafik etkileri karşısında yeterince kararlı olabilmesi için çevresel dayanıklılık koşullarının da iyi olması gerekir.

Karışımın aşınmaya karşı direnci doğal olarak agreganın aşınma özelliğine bağlıdır. Aşınma tabakalarında daha sert agrega kullanılarak daha yüksek bir dayanıklılık sağlanabilir. Şişmeye karşı direnç de gene agreganın şişme özelliklerine bağlıdır. Dayanıklılığa etkiyen diğer önemli faktör ise nemdir.

Asfaltın oksitlenmeye karşı direncinde, asfaltın yaşlanma karakteristikleri ve bitümlü karışımındaki boşluk oranı önemli rol oynar. Oksitlenme aynı zaman da kaplamanın kırılmaya karşı direncini de etkiler. Çünkü, oksitlenme sırasında penetrasyonun düşmesi ile kaplama daha kırılğan bir hal alır. Bu nedenle kırılmaların artmasına sebep olan asfaltın oksitlenmesini en alt seviyede tutmak için bitümlü karışımın boşluk yüzdesinin belirli sınırlar içerisinde kalması sağlanmalıdır. Üst kaplamanın dayanımını aşığıdaki nedenler etkiler;

- Düşük asfalt yüzdesi, kaplamanın kuru bir şekilde görünmesine ve agreganın soyulmasına,
- Yetersiz sıkışma ve tasarım hatası nedeniyle yüksek boşluk yüzdesi, kırılmaya ve ayrışmaya neden olan asfaltın erken yaşlanmasına,
- Soyulmaya karşı hassas agrega kullanımı, asfaltın agregadan soyulmasına ve agreganın sökülmesine sebep olurlar.

3.1.4. Kaymaya karşı direnç

Bitümlü kaplama yüzeyinin sürtünme ile vasıtaların güvenli bir şekilde durmasını ve hareket etmesini sağlaması, kaplamanın kaymaya karşı olan direncine bağlıdır. Bu özellik kaplamanın yüzey dokusu kadar asfalt karışımındaki asfalt çimentosu oranı ve boşluk oranı ile ilgilidir. Yumuşak agregalar fazla aşındıkları için düz bir yüzey oluştururlar. Diğer taraftan karışımda çok fazla asfalt varsa veya yeterli boşluk yoksa, trafiğin oluşturduğu sıkıştırma tesiri ile veya sıcak havalarda agregaların genleşmesi sonucunda, kaygan bir yol yüzeyi meydana gelir. Bu duruma kaplamanın terlemesi denir. Bu sakıncanın ortaya çıkmaması için beton asfalt karışımı homojen olmalı, üretim ve kullanma sırasında segregasyona (ayrışmaya) uğramamalıdır. Diğer taraftan karışımda gevrek agrega bulunmamalıdır. Çünkü gevrek agrega tekerlek etkisiyle cilalanır. Cilalanmada kayma direnci bakımından büyük sorunlar ortaya çıkarır. Cilalanma sonunda kayma direnci büyük oranda azalır.

- Fazla asfalt yüzdesi, kuma ve düşük kayma direncine,
- Agregada gradasyonunun kötü olması, çok düzgün yüzeyli kaplama, suyun yüzeyden drene olamamasına,
- Agregada cilalanma değerinin düşük olması, düşük kayma direncine sebep olur.

3.1.5. Yorulmaya karşı direnç

Bir üst yapının yorulmaya karşı direnci, trafik yükleri altında oluşan tekrarlı gerilmelere karşı direnci gösterir. Karışımdaki boşluk yüzdesi ve asfaltın viskozitesi yorulmaya karşı direnç üzerinde çok etkilidir. Yetersiz sıkışma, yüksek boşluk yüzdesi, asfaltın yaşlanması ve sertleşmesi yorulma direncini azaltır. Üst yapının kalınlığı ve mukavemeti, taban zemininin taşıma gücü, üst yapı ömrünü etkileyen diğer faktörlerdir.

- Düşük asfalt yüzdesi, yorulma çatlağına,
- Yüksek tasarım boşluğu, asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlağına,
- Yetersiz sıkışma, asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlağına,
- Yetersiz üst yapı kalınlığı, aşırı eğilmeyi takiben yorulma çatlağına sebep olur.

3.1.6. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, asfalt kaplamanın hava veya suya karşı direnci olarak tanımlanır. Bitümlü karışımdan oluşmuş kaplama tabakasının alt tabakalara su geçirmeyecek şekilde geçirimsiz olması gerekir. Geçirimsizlik, karışımdaki hava boşluğu yüzdesi ile belirlenir. Karışımdaki boşlukların birbiri ve yüzeyle bağlantılı olması, geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörlerdir. Boşluk yüzdesinin yüksek olması suyun ve havanın kolaylıkla karışım içerisine girmesine, oksidasyona ve agreganın ayrışmasına neden olur.

3.1.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılmasındaki kolaylık olarak ifade edilebilir. Kaba agrega ve fillerin çok fazla olması işlenebilirliği olumsuz yönde etkiler. Ancak işlenebilirliği çok iyi olan karışımlar yumuşak karışımlardır ve bunların trafik yükleri altında deforme olmaları çok daha kolaydır.

3.2. Esnek Üstyapılarda Gerilme Durumu

Yollarda oluşan gerilmeleri iki gruba ayırabiliriz:

- Trafik yüklerinden meydana gelen mekanik gerilmeler,

Yol üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları, tekerlek bandajları aracılığı ile kaplama yüzeyine aktarılır. Kaplamaya aktarılan yük araçların dingil sayılarıyla ilgilidir. Yola gelen yüklerin, üstyapı hesaplarında tam olarak kavranabilmesi ve ekonomik olmayan kalınlıkların çıkmaması, ayrıca ağır dingil yüklerinin bozucu olan etkisini önlemek için dingil yükleriyle dingiller arası mesafeler sınırlandırılmıştır. Ülkemizde uygulanan sınırlamalara göre, dingiller arasında en az 1 m, en çok 1,99 m mesafe olmalıdır. Dingil ağırlığı, 13 tonu aşmamalıdır.

- Sıcaklık ve nem gibi iklim koşullarından dolayı meydana gelen fiziksel gerilmeler de kaplama tasarımında gözönüne alınmalıdır.

3.2.1. Trafik yüklerinden meydana gelen mekanik gerilmeler

Bu gerilmeler, hareket halinde olan veya duran motorlu taşıtların, tekerlek bandajları aracılığıyla yola uyguladıkları gerilmelerdir. Yol yüzeyi ile tekerlek arasına etkiyen düşey yükler ve yatay kayma kuvvetleri yol tabakalarında basınç, çekme, eğilme ve kayma gerilmeleri meydana getirir. Bu gerilmeler, dingil yükü, bandajın şişirme basıncı, taşıtın hızı, bandajın üzerindeki yiv ve setler olmak üzere birçok faktöre bağlıdır.

Hareketli tekerlek yüklerin etki süresi, hıza bağlı olarak 0,1 ile 0,01 saniye arasında değişir. Yapılan araştırma ve gözlemler, hızlı giden taşıtların yavaş seyreden taşıtlara göre yol yüzeyine daha düşük gerilmeler uyguladıklarını göstermiştir.

Karayolu üstyapısına gelen yükler, bandajın değme alanı üzerinde ve yayılma şekilleri kesin olarak bilinmeyen tarzda asfalt kaplamaya iletirler. Bir pnömomatik bandaj, kendisine etkiyen tekil yükün şiddetine bağlı olarak asfalt kaplama üzerinde bir değme alanı oluşturur.

Motorlu taşıt yapım tekniğinin ve karayolu geometrik standartlarının bugünkü durumda, nizami yüklenmiş bir taşıt için, bandajdan kaplamaya etkiyen maksimum gerilme 7 kg/cm^2 dir. Hesapların kolayca yapılabilmesi için bu gerilmenin bandajın şişirme basıncına eşit olduğu kabul edilmektedir.

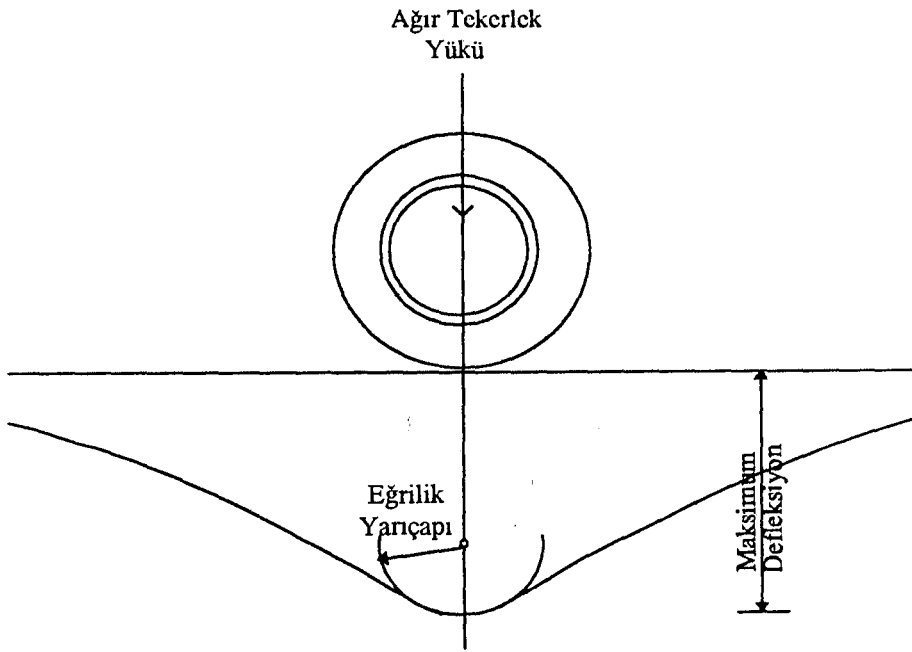
3.2.1.1. Bandaj altında esnek üstyapının deformasyonu ve gerilmeler

Yük altında bulunan bir pnömomatik bandajın etkisi ile yol üstyapısı deformasyona uğrar. Deforme olmuş esnek bir üstyapının durumu Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, bandaj ekseninin altına rastlayan noktada, en büyük deformasyon (defleksiyon) oluşur. Bu noktadan itibaren sağa ve sola doğru olan defleksiyonlar önce bir dairenin eğrilik yarıçapına uyarak küçülmektedir. Üstyapı deformasyonunun bu genel karakterine uygun olarak tek ve çift bandajların hareketi ile gerilmelerin ne şekilde değiştiği Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Şekil 3.2(a)’da, asfalt kaplamalı bir üstyapı üzerinden geçen bir tekil dingilin asfalt betonu içerisinde oluşturduğu çekme ve basınç gerilmeleri ile asfalt kaplamanın üst yüzeyinde bulunan herhangi bir noktada oluşan

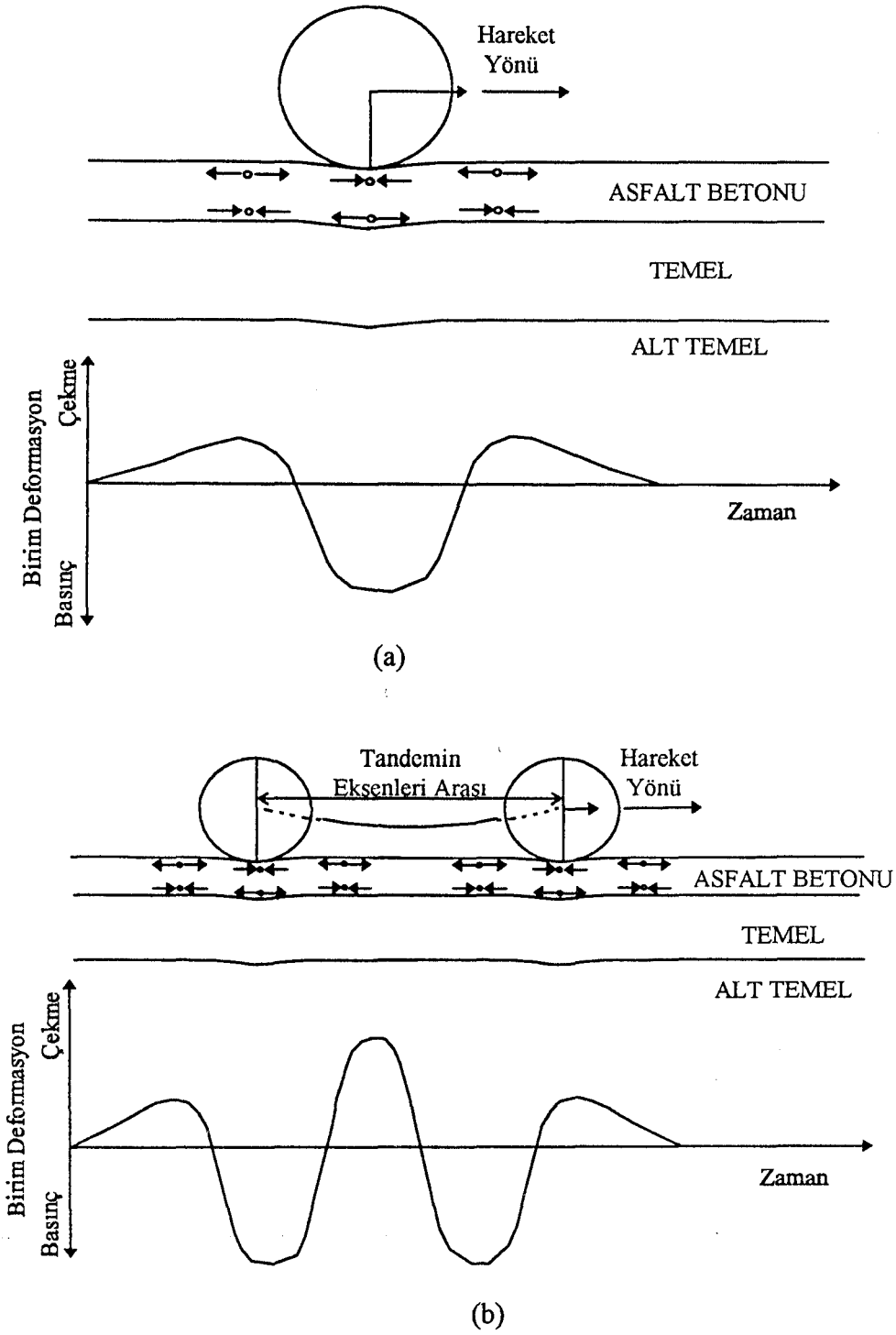
deformasyonlar ve Şekil 3.2(b)'de bir çift dingile ait gerilme ve deformasyonlar gösterilmiştir. Bir asfalt betonu kaplamasının üst yüzeyinde herhangi bir noktada tekil dingilin her geçişinde 2 defa çekme, 1 defa basınç, çift dingilin her geçişinde ise, 3 defa çekme ve 2 defa basınç gerilmesi oluşmaktadır. Asfalt kaplamalarda oluşan çekme gerilmesinin 15 ile 20 kg/cm² arasında olduğu saptanmıştır.

İleriye doğru hareket sırasında, ayrıca tekerleklerin emme etkisiyle agregayı söküp ayırmak isteyen çekme gerilmeleri doğar.

Yatay yükler genellikle vasıtaların hızlandığı, frenlediği ve yön değiştirdiği kısımlarda kaplama tabakasının alt tabakalardan ayrılmasına yol açabilir.



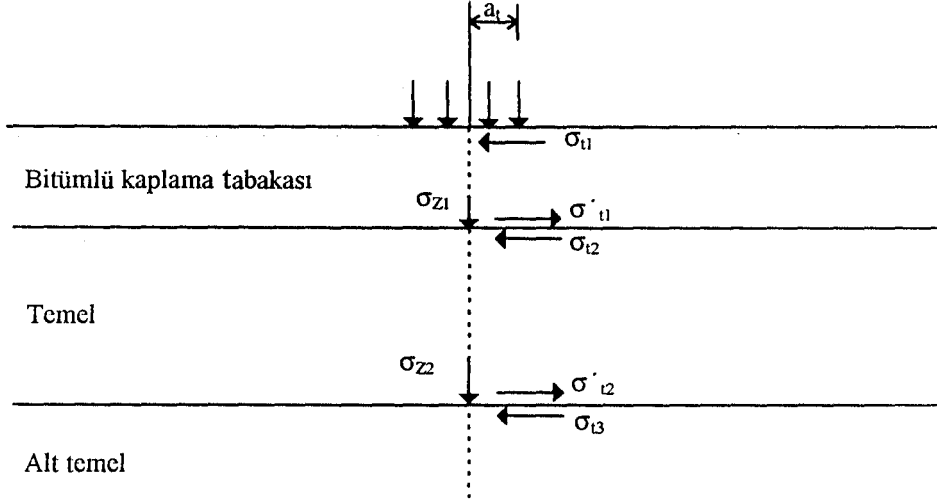
Şekil 3.1. Pnömatik Bandaj Altında Üstyapı Yüzeyinin Deformasyonu (Umar ve Ağar 1991)



Şekil 3.2.(a) Tek Bandajın Asfalt Beton Tabakasında Meydana Gelen Gerilmeler ve Bandajların Hareketiyle Gerilmelerde Görülen Değişiklikler

Şekil 3.2.(b) Çift Bandajın Etkisi İle Asfalt Beton Tabakasında Meydana Gelen Gerilmeler ve Bandajların Hareketiyle Gerilmelerde Görülen Değişiklikler (Umar ve Ağar 1991)

Şekil 3.3’de üç tabakalı bir üstyapıda, yük eksenini etrafında oluşan düşey ve yatay gerilmeler gösterilmiştir.

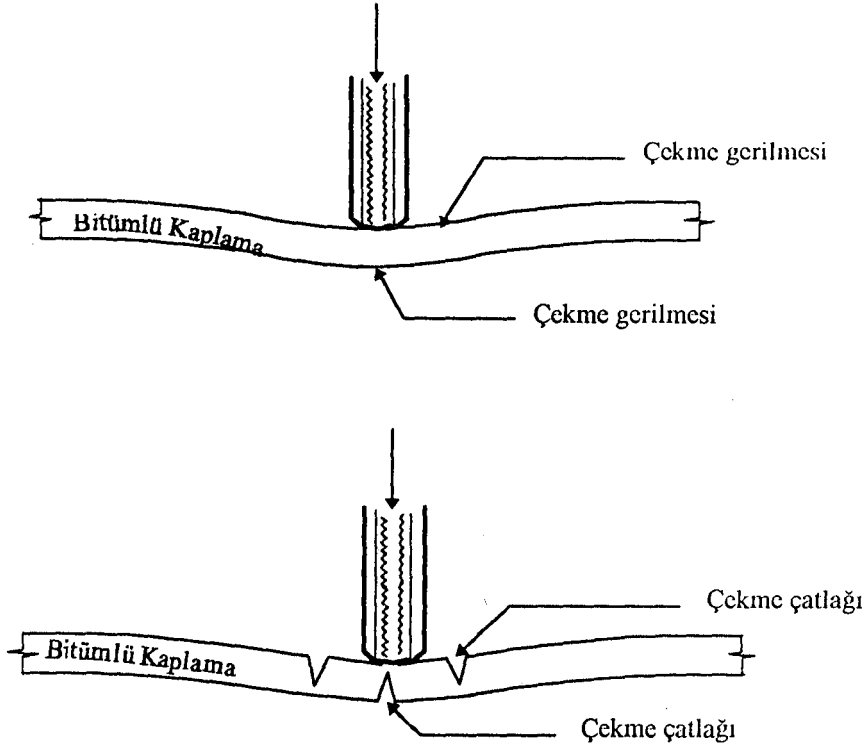


Şekil 3.3. Üç Tabakadan Oluşan Bir Esnek Üstyapıda Yük Eksenini Etrafında Oluşan Düşey ve Yatay Gerilmeler (Umar ve Ağar 1991)

Bu şekilde;

- $2a_t$: Tekerleğin iz genişliği
 σ_z : Düşey gerilme
 σ_τ : Yatay gerilme

Bir üstyapının bozulması ya yüzeydeki kaplama tabakası temel tabakasının arakesitindeki aşırı çekme ($\sigma'_{\tau 1}$) veya temeldeki aşırı basınç (σ_{z2}) sebebiyle olur. Yol üstyapı tabakalarının boyutlandırılmasında, (σ_z) ve (σ_τ) gerilme değerlerinin her tabaka için kritik gerilme değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir. Eğer (σ_{z2}) gerilmesi aşırı ise temel tabakasında üniform olmayan önemli oturmalar olur ve bunun sonunda kaplama tabakasında büyük çekme gerilmeleri doğar. Çekme gerilmeleri sonucunda meydana gelecek çatlaklar Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kaplama Tabakasının Aşırı Çekme Gerilmeleri Altındaki Bozulması (Umar ve Ağar 1991)

3.2.1.2. Esnek üstyapılarda oluşan gerilmelerin hesaplanması

Esnek üstyapılar içinde oluşan gerilmelerin hesabında, ideal koşullara dayanan teorilerden yararlanılır. Bir karayolunun alt ve üst yapıları hiçbir zaman teorinin kabul ettiği özelliklere sahip değilse de, teori yardımıyla nicelik olarak, dingil yükü şiddetlerinin, bandaj basınçlarının ve dingil tertiplerinin üstyapı kalınlığına ne şekilde etkiğini anlamak mümkündür.

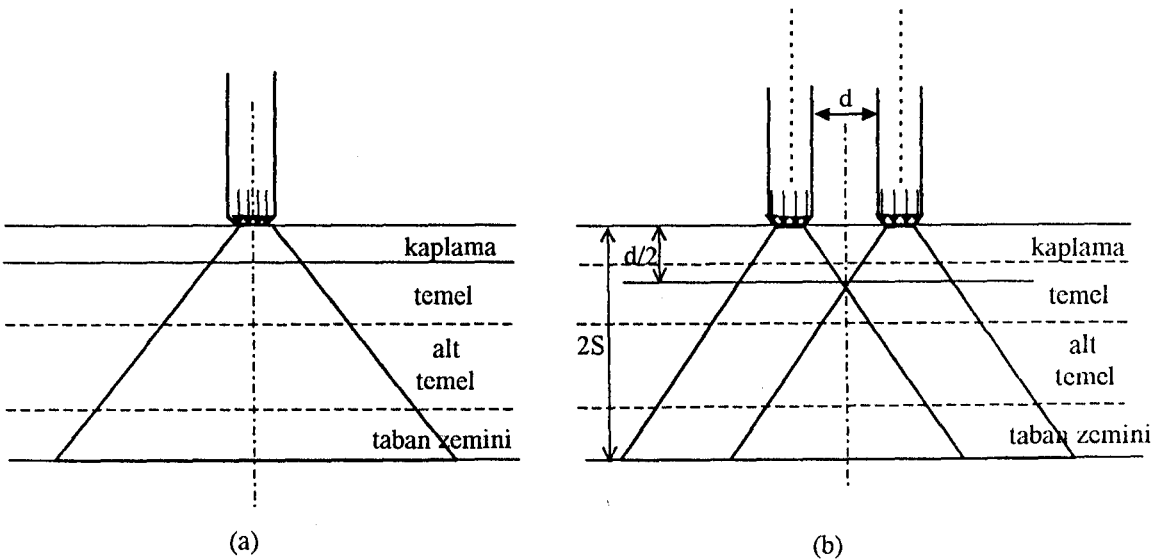
3.2.1.3. İdeal ortamlar içindeki gerilmeler

Herhangi bir yatay düzleme etkiyen bir tekil yük etkisinde, yatay düzlem altındaki bir ideal ortam içinde eşit düşey gerilmelerin çan yüzeyleri boyunca dağıldığı bilinmektedir. En büyük gerilmeler, yükün uygulanma noktasından geçen düşey düzlem

üzerine rastlamaktadır. Yatay düzlemin hemen altında gerilme en büyük değerine ve teorik olarak sonsuzda da sifıra ulaşmaktadır. Pratik sonuçlar için gerilmenin sınırlı bir derinlikte sıfır olduğunu kabul etmek mümkündür.

Esnek üstyapılar incelenirken tekil yükler sözkonusu değildir. Üst yapıya etkiyen yükler genellikle bir daire veya elips üzerine yayılmış ve bandaj iç basıncına eşit gerilmeler olarak kabul edilir. Tekil yükte olduğu gibi yayılmış yüklerde de derinliğe göre yukarıda açıklanan hususlara uymaktadır. Tek tekerlek ve çift tekerlek olması halinde, düşey gerilmelerin yoldaki dağılışı Şekil 3.5’ te verilmiştir.

Şekil 3.5 (b)’ de görüldüğü gibi, iki tekerlek önce tek tek etkimektedir. Tekerlekler arası mesafenin (d) yarısına ($d/2$) inildiğinde tekerleklerin etkisi yük ekseninden geçtiği farzedilen bir bölgede üst üste toplanmaktadır. “ $2S$ ” mesafesinden daha büyük bir derinlikte gerilmelerin ihmal edilebilir bir seviyeye düştüğü ve sıfır olduğu kabul edilmektedir. Esnek üstyapıda oluşan gerilmelerin değeri, yolun en üst tabakasından aşağıya doğru inildikçe azaldığı için, kullanılan malzemelerin özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilir.



Şekil 3.5. (a) Tek Tekerleğin Yollarda Meydana Getirdiği Düşey Gerilme (Umar ve Ağar 1991)

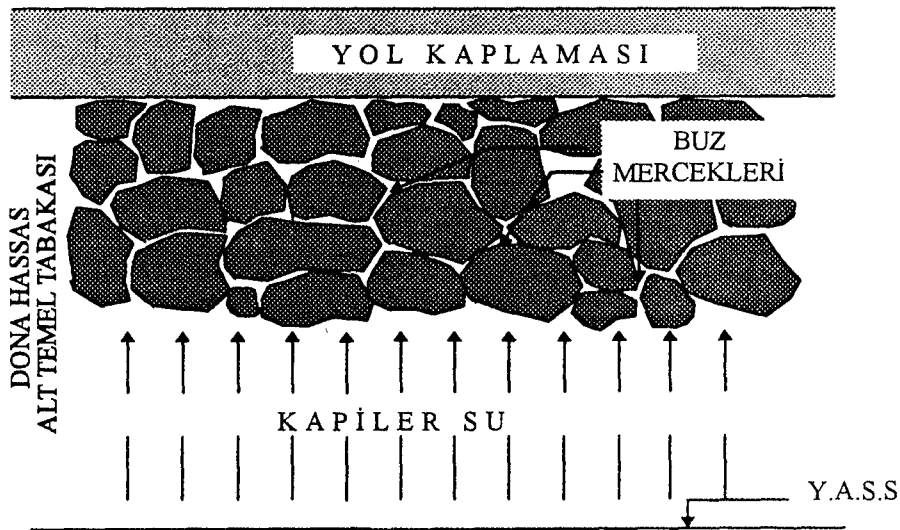
Şekil 3.5. (b) Çift Tekerleğin Yollarda Meydana Getirdiği Düşey Gerilme (Umar ve Ağar 1991)

3.2.2. Sıcaklık ve nemin değişmesinden doğan fiziksel gerilmeler

Sıcaklığın düşmesi halinde bitümlü kaplama tabakası büzülmeğe ister. Temel tabakası ise bu harekete karşı koyar. Bu olay sonucunda kaplama tabakasında çekme gerilmeleri ortaya çıkar. Diğer taraftan mineral agrega için hacimsel genişleme katsayısı 3.5×10^{-5} , asfalt için ise 6×10^{-4} ' tür. Hacimsel genişleme katsayıları arasındaki fark, sıcaklık düşüncü agrega daneleri arasındaki asfalt filminde çekme gerilmelerinin oluşmasına sebep olur. Bu iç gerilmeler yeteri kadar büyükse asfalt filmin kopmasına ve kaplamada oyuklar oluşmasına neden olur.

Don kabarması sonucunda bitümlü kaplama tabakasında çekme gerilmeleri oluşur. Don kabarmasına karşı hassas olan taban zemini ve temel tabakasında oluşan buz mercekle rin yukarı doğru yükselip yol kaplamasında meydana getirdikleri kabarmaya "Don Kabarması" denir. Bu olayın mekanizması Şekil 3.6'da verilmiştir.

Kabarma olayı çok karışık olmakla beraber ve bir çok nedenlere bağı olarak ortaya çıkar. Önceleri don kabarması don anındaki zemin suyu hacminin artmasına bağlanmaktaydı. Fakat, suyun hacmi buz haline geldiği zaman %9 oranında artar. Birçok don olaylarında, buz kristallerinin şeklinin etkili olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.6 Don Kabarması Olayının Mekanizması (Umar ve Ağar'dan (1991) değiştirilerek alınmıştır.)

Zeminin dona karşı hassas olması, hava sıcaklığının yavaş yavaş azalması ve zeminde suyun bulunması gibi faktörlerle don kabarması meydana gelmektedir.

Hava sıcaklığı azalıp zemini ve zemin suyunu etkilediği zaman, zemin boşluklarındaki su donar. Bazı hallerde su 0 °C'nin altında da likit halde kalabilir. Diğer taraftan çok soğumuş su ve buz yüksek bir çekim gücüne sahip olduğundan, önce su buz kristalleri haline dönüşür, daha sonra zemin kapilarite için yüksek bir duyarlılığa sahipse, buz kristalleri buz mercekleri oluncaya kadar büyür ve sonuçta don kabarması meydana gelir. Bazı hallerde don kabarması nedeniyle bitümlü kaplama tabakasında oluşan çekme gerilmeleri kaplamanın direnç sınırını aşar, böylece yolda enine ve boyuna yönde çatlaklar oluşabilir.

Esnek üstyapıdaki çatlaklardan yalnızca termik (ısısal) gerilmeler sorumlu tutulmaz. Fakat onların esas faktör oldukları ve mekanik gerilmelerle birleşince tehlikeli bir durum oluşturdukları unutulmamalıdır.

3.3. Asfalt Betonlu Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar

Asfalt betonu kaplamalardaki bozulmaları şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma üç ana grupta toplamak mümkündür.

Bu bozulmaların genel nedenlerini ise temel, alt temel ve taban zemininin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin bozucu etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun özellikleri olarak sıralayabiliriz.

Asfalt betonunda oluşan bozulmaları ise aşağıdaki nedenlere bağlamak mümkündür.

a) Uygun olmayan malzeme kullanılması

- İyi seçilmemiş ve iyi kontrol edilmemiş granülometri
- Karışımda yüksek oranda yuvarlak malzeme kullanılması
- Çürük agrega kullanılması
- Kirli agrega kullanılması
- Çabuk cilalanan agrega kullanılması

b) Asfalt betonu karışımının hatalı hazırlanması

- Asfalt yüzdesinin hatalı olması
- Filler yüzdesinin hatalı olması

- Granülometrinin bozuk olması
- Yetersiz karıştırma
- Yetersiz sıcaklık kontrolü

c) Asfalt betonu kaplama yapımının hatalı olması

- Yetersiz sıkıştırma
- Aşırı sıkıştırma
- Serme-sıkıştırma sıcaklığının düşük olması
- Yapım sırasında meydana gelen segregasyon
- Astar veya yapıştırma tabakasının gerekli özenle yapılmaması

3.3.1. Şekil değiştirme

Karayollarımızda en sık görülen bozulmalardan biri olan şekil değiştirme, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orjinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır. Şekil değiştirme, alt tabakaların (temel, alt temel ve taban) hareketlerine bağlı olabildiği gibi, asfalt beton kaplamasının stabilitesinin yetersizliğinden de oluşabilmektedir.

Yük altında meydana gelen deformasyonlar, geçici (elastik) deformasyonlar ve kalıcı (plastik) deformasyonlar olmak üzere ikiye ayrılır. Stabilitate yüksek olduğu sürece toplam deformasyon az olduğu gibi bu deformasyonun geçici kısmı fazla, kalıcı kısmı çok azdır. Stabilitenin düşük olması durumunda ise durum tersine döner. Sadece kalıcı deformasyonların oluşması halinde ise stabiliteden söz edilemez.

Yüksek sıcaklıklar asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabiliteyi düşürür. Yük tekrarı kalıcı deformasyonların artmasına neden olur. Yani, kalıcı deformasyonların sıcaklık etkisi ve yük tekrarı şekil değiştirmeye sebep olur.

Şekil değiştirmeyi oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması olarak 7 bölüme ayırabiliriz.

1) **Oturmalar**, bitümlü tabakalara ait olmayan bozulmalardan olup, alt tabakalarda oluşan bozulmaların yüzeye yansımalarıdır.

Oturmalar aşağıdaki nedenlere bağlanabilir.

- a) Alt tabaka (granüler temel ve alt temel) kalınlıklarının yetersizliği nedeni ile bu tabakalarda oluşan oturmalara,
- b) Tabanda oluşan oturmalara,
- c) Banketlerden gelmesi gereken desteğin az olmasına,
- d) Yeraltı su seviyesinin yüksek olmasına,
- e) Drenaj yetersizliğine,
- f) Kil yükselmesine (kilin tabandan granüler alt temel ve temele yükselerek bu tabakaları kirletmesine) bağlıdır.

Bu tip bozulmalar ancak alt tabakaların yeterli olarak projelendirilmesi ve şartnamelere uygun şekilde yapılması ile önlenebilir.

2) **Yerel çökmeler**, oturmalarından ayıran husus küçük ve dairesel alanlar (0.5- 2.5 m yarıçaplı) halinde ortaya çıkmalarıdır. Yerel çökmeler aşağıdaki nedenlerle oluşur:

- a) Yüzey tabakasının bir noktada yetersiz sıkışması,
- b) Temel veya alt temelin bir noktada yetersiz sıkışması,
- c) Belli bir noktada su toplanması (drenaj yetersizliği),
- d) Belli bir noktada kil yükselmesi,
- e) Rijitlik kazanmış temelin bir noktada ayrışmaya uğraması.

Bu tip bozulmalar drenaj ve kil yükselmesi önlemlerinin yanısıra yapım sırasında yeterli kontrol ve özenli işçilik ile önlenebilir.

3) **Tekerlek izi oluşması**, asfalt betonu kaplamalarında en sık görülen, gerek teknik ve gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi oluşması özellikle ülkemiz gibi problemlili araziye sahip, tarafığı ağır ve sıcak ülkelerde problem olmaktadır. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında yada sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğar. Tekerlek izi oluşmasını meydana getiren nedenleri, alt tabakalara ve bitümlü tabakalara bağlı nedenler olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür.

Alt tabakalara bağlı nedenler, alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması ve alt tabakanın veya tabanın konsolidasyona (oturmaya) maruz kalmasıdır. Bitümlü tabakalara bağlı nedenleri ise karışım stabilitesinin yetersiz oluşu, aşınma tabakasının yetersiz sıkışması ve ağır trafik altında aşınma tabakasının aşırı sıkışması olarak sıralayabiliriz.

Ekonomik sonuçları çok önemli kabul edilen tekerlek izi oluşmasının önlenmesi çok yönlü bir çalışmayı gerektirmektedir. Asfalt betonu kaplamalar sadece iklim ve trafik koşullarına uygun olarak inşaa edilmiş yeterli taban, alt temel ve temeller üzerinde kullanılmalıdır. Bundan başka bölgelerin iklim ve trafik koşullarına uygun, deformasyonlara dirençli (stabilitesi yüksek) asfalt betonu formülleri geliştirilmelidir. Karışımlarda bölge sıcaklıkların müsadese nisbetinde, mümkün olduğu kadar sert bağlayıcı kullanılmalıdır.

4) **Ondülasyonlar**, asfalt betonu karışımların stabilite yetersizliğine bağlı bozulmalardır. Yalnızca bitümlü tabakalar içinde oluşur. Alt tabakalarla ilgili değildir. Ondülasyonların önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar kullanılması gerekir.

5) **Kabarmalar**, tabanın veya üstyapının şişmesi ile oluşan yerel bozulmalardandır. Ana nedeni don etkisidir. Ancak şişme potansiyeli yüksek killi tabanlar da kaplamada kabarmaya yol açabilirler. Kabarmaların önlenmesi için üstyapı projelendirilmesinde don etkisi dikkate alınmalı; şişme potansiyeli olan tabanlarda üstyapı inşaa edilmeden drenaj, stabilizasyon gibi önlemler düşünölmelidir.

6) **Yığılma**, asfalt betonu kaplamasının üst kısmının sıcak havalarda tekerleklerin mekanik etkisi yolu ile ötelenerek, yol eksenine dik ya da paralel olarak yığılması olarak tanımlanır. Özellikle temeli rijit (beton) veya yarı rijit (çimento stabilizasyonu) asfalt betonu kaplamalarda görülür. Stabilite yetersizlikleri, yüksek sıcaklıklara ve tabakalar arasında kullanılan yapıştırıcı (bitüm) malzemenin çok az veya çok fazla kullanılmasına bağlıdır. Yığılmaların önlenmesi yüksek stabiliteli karışım ve sert bağlayıcı kullanmakla mümkündür.

7) **Lastik deseni oluşması**, taşıtların lastik desenlerinin kaplama yüzeyine çıkmasıdır. Desen oluşmasını tam anlamıyla bir bozulma olarak nitelendirmek güçtür. Fakat meydana geldiği bölgede bir anormallik olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Ağır taşıtların uzun süreli park etmelerinden oluşursa, stabilite yetersizliğine bağlanabilir. Hareketli taşıtlar oluşturuyorsa, o kesimde kusma olduğunu ifade eder. Lastik deseni oluşmasının önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar kullanmak ve kusmayı önleyici önlemler almak gerekmektedir.

3.3.2. Çatlamalar

Asfalt betonunda oluşan çatlamaları, trafik etkisine bağlı olan çatlamalar ve trafik etkisine bağlı olmayan çatlamalar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

Trafik etkisine bağlı çatlamalar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç defa geçmesi sonucunda, ya da fazla sayıda geçmesi sonucunda oluşur ki bu ikincisine “yorulma” çatlakları denir.

Birinci durumda ağır trafik yükünün oluşturduğu gerilme eğilme-çekme direncini aşmaktadır. Yorulmada ise direnç aşılmamakta, fakat dingil yüklerinin doğurduğu kalıcı deformasyonlar, tekrar sayısının fazla olmasından dolayı birikime maruz kalmaktadır.

Ağır dingil yüklerinden hariç, taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamalarında çatlamalara yol açabilmektedir. Çatlamalar trafik yüklerine bağlı olmaksızın sıcaklık ve nemin değişimi ile olabilirler. Bu etkiler tek başlarına veya dingil yükleri ile birleşerek kaplamayı çatlatabilirler. Değişik çatlama tipleri görülebilir.

1) **Timsah sırtı çatlaklar**, kaplamanın birbirine irtibatlı bloklar halinde çatlamasıdır. Aşırı dingil yükleri ve asfalt betonu veya diğer tabakalarda oluşan hacim değişiklikleri bu tip çatlamalara yol açabilir.

2) **Yorulma çatlakları**, birbiriyle irtibatlı küçük bloklar halinde ortaya çıkan çatlaklardır. Dingil yüklerinin çok sayıda geçişiyle oluşur.

3) **Büzülme çatlakları**, timsah sırtı çatlamalar şeklinde ortaya çıkan çatlamalardandır. Timsah sırtı ve yorulma çatlaklarından farkı, blokların büyük olması ve çatlakların çıkış noktalarında daha önce oluşmuş çatlaklarla dik açı oluşturmasıdır. Çatlakların genişliği oluşma zamanı hakkında fikir verir, dolayısıyla en geniş çatlaklar ilk oluşan çatlaklardır. Büzülme çatlakları asfalt betonunun kendi içinde yada temel veya tabandaki hacim değişimleri sonucunda oluşur.

4) **Kenar çatlakları**, kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içerde ve yol eksenine paralel olarak oluşur. Genellikle banketlerin yeteri kadar yanal destek sağlamadığı kesimlerde görülür. Kenar çatlakları, drenaj yetersizliği, don, üstyapı ile banket arasında büyük nem farkı bulunması (banketlerin aniden kuruması) nedeni ile de oluşabilir. Kaplama kenarına çok yakın yoğun bitki örtüsü ve ağaçlar da yol gövdesinden su çekmek sureti ile bu tip çatlamalara yol açabilir.

5) **Derz çatlakları**, iki şerit arasında oluşan çatlaklardır. Yapım hatasından oluşabilir. İkinci şerit dökülürken yeterli bindirmenin yapılmaması zamanla iki şeritin birbirinden ayrılmasına yol açar. Oluşan çatlak, geririmsizliği azalttığı gibi ayrışmalara da zemin hazırlar. Derz çatlakları kaplama ile banket arasında da oluşabilmektedir.

6) **Enine çatlaklar**, yol eksenine dik olarak oluşan çatlaklardır. Diğer tip çatlaklara yol açan nedenler (yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj v.b) enine çatlakları oluşturabilir. Bu nedenler dışında enine çatlaklar, sericinin uzun süren duraklamalarla alışması ve sıcaklıktaki ani düşmelerinin kaplamalarda oluşturduğu gerilmeler nedeni ile meydana gelmektedir.

7) **Yansıma çatlakları**, genellikle rijit kaplamalar üzerine takviye tabakası olarak serilen asfalt betonu kaplamalarda görülür. Alttaki beton kaplamanın enine ve boyuna derzleri, eğer varsa diğer çatlakları üste yansır. Çimento veya kireç stabilizasyonlu temeller üzerine inşa edilen kaplamalarda da yansıma çatlakları oluşabilir. Alt tabakalarda daha önce oluşmuş çatlakların üste yansıması olarak ortaya çıktığından, enine, boyuna, blok veya köşegen şekil alabilirler.

Takviye tabakasının veya kaplamanın ince olması yansıma çatlaklarının oluşumunu kolaylaştırır. Yansıma çatlaklarının önlenmesi için, mevcut kaplamanın derz ve çatlaklarının, takviyeden önce, özenle tamir edilmesi ve takviye tabakasının en az 10 cm kalınlıkta yapılması önerilmektedir.

8) **Öteleme (yüzey kayması) çatlakları**, yüzey tabakasının, tekerlek yüklerinin oluşturduğu yatay kuvvetlerin etkisiyle alt tabaka üzerinde kayarak iç içe hilaller şeklinde çatlamaıdır. Bunlara parabolik çatlaklar da denir.

Öteleme çatlakları yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmamasından doğar. İki tabaka arasında bağ (yapışma) yetersizliği, yapıştırma tabakasının yokluğu, yapıştırıcının çok miktarda kullanılması, yapıştırıcı malzemenin uygulanmasından sonra çok beklemeden dolayı tozlanmaya ve ıslanmaya maruz kalması yüzey kaymalarına sebep olabilir. Karışımın çekme direnci ve tabakanın kalınlığına bağlı ataleti ötelenme çatlamlarına karşı koyar. Bu bakımdan kalın tabakalarda bu tip çatlama ihtimali daha azdır.

3.3.3. Ayrışmalar

Agrega danelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıdır. Ayrışma, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda çok sık görülen bir bozulmadır. Ayrışmaya yol açan nedenler:

- a) Bağlayıcının (asfaltın) mekanik etkiyle kopması,
- b) Karışımın kötü kalitede olması,
 - Düşük asfalt yüzdesi
 - Çok az veya çok fazla filler yüzdesi
 - Kirli ve zayıf agrega kullanılması.
- c) Yüzey tabakasının ince olması,
- d) Granüler alttemel ve temele tabandan kil yükselmesi,
- e) Drenaj yetersizliği,
- f) Yetersiz sıkıştırma,
- g) Nemli ve soğuk havada yapım,
- h) Plentte (karışımın hazırlandığı santral) asfaltın aşırı ısıtılması,
- i) Yapım sırasında segregasyon oluşması,
- j) Ayrışmayı kolaylaştıracak derecede kuma oluşması,
- k) Kimyasal maddelerin (özellikle tuz ve yağların) etkisi,
- l) Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması,
- m) Su ve kil etkisi ile soyulma.

Bu nedenlerin hiçbiri tek başına ayrışmayı başlatmaz. Ayrışma bunlardan bir kaçının birarada bulunması halinde trafiğin mekanik etkisiyle başlar. Ayrışma olayı zamanla artar. Kaplamanın ömrünü kısaltır ve yolun seyir konforuyla seyir güvenliğini azaltır. Başlıca ayrışma tipleri aşağıda verilmiştir.

1) **Folluk tipi oyuklar**, takriben 25-75 cm çapında dairesel, folluğu andıran oyuklardır. Yukarıda sayılan nedenlerden ilk altısı bu tip bozulmaların oluşumunda önemli rol oynar. Folluk tipi oyuklar kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, trafiğin gerektirdiği üst yapının inşası, drenaj, özenli yapım ve özellikle yeterli sıkıştırma ile önlenir.

2) **Sökülmeler**, yüzeyden alta doğru ya da kenardan içe doğru agregaların zamanla yüzeyden koparak ayrılmasıdır.

3) **Tabaka halinde söklmeler**, yüzey tabakasının ince olması, alt tabaka ile yüzey tabakası arasında yapıştırma tabakası kullanılmaması ve yapıştırmanın yetersiz olması nedeni ile oluşan bozulmalardır. Daha ziyade derz çatlakları civarında oluşur.

4) **Soyulma**, agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması ve dolayısıyla agrega danelerinin çıplak kalması durumudur. Soyulma, sürekli gronlometrili, pratik anlamda geçirimsiz kaplamalarda çok az görüldüğünden, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda bugün için büyük bir sorun değildir.

5) **Kayganlık**, kaplamanın taşıtların aşındırma etkisi ya da kasma nedeni ile kayma direncinin azalması, başka bir deyişle, sürtünme katsayısının düşmesidir. Özellikle kaplamanın ıslak olması halinde ve yüksek hızlarda seyir güvenliğini büyük ölçüde azaltması nedeni ile önemli bir bozulma tipidir. Kayganlık daha ziyade yüzeydeki agregaların cilalanması ile oluşur. Ancak kasma gösteren kesimlerde kaygan olabilir.

6) **Cilalanma**, agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Özellikle kalkerden elde edilenler agregalar, başlangıçta köşeli ve przl olsalarda taşıtların aşındırma etkisiyle pürüzlülüklerini kaybederek cilalı bir hal alırlar. Kaplama ile taşıtların lastikleri arasındaki sürtünme katsayısı, özellikle kaplamanın ıslak olması halinde düşer ve 60-80 km/h' tan yüksek hızlarda kaymalara neden olabilir.

7) **Kasma**, karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması durumudur. Kasma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kasma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımında boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kasmaya sebep olabilir. Karayollarımızda bakım görmüş kesimlerde sık görülen kasma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri konusunda dikkatli olmak sureti ile önlenabilir.

4. KULLANILAN MALZEMELER

4.1. Agregas

Bu çalışmada, Eskişehir ili merkez Keskin köyünde “Estaş A.Ş.’ne” ait kırmataş ocağından temin edilen gri-beyaz renkli kalker esaslı agregas kullanılmıştır. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü’nün asfalt betonu-aşınma tabakası için belirlediği ve en çok kullandığı Tip-2 gradasyonu seçilmiştir [25]. Filler malzemesi olarak %5 oranında kullanılan taş tozunun yapılan kıvam deneyleri sonucunda plastik özelliğe sahip olmadığı tespit edilmiştir. Kullanılan agregaya ait gronölometri eğrisi ve aşınma tabakası Tip-2 limitlerine ait değerler Çizelge 4.1’de, granölometri eğrileri ise Şekil 4.1’de verilmiştir. Agreganın karışım hesaplarında kullanılmak üzere bulunan özgül ağırlıkları ve su emme miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Agregaya ait bazı fiziksel özellikler ve aşınma tabakasında kullanılabilme limitleri [25] Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Agregas Gradasyon Değerleri

Elek No	Dane Boyutu (mm)	Toplam Geçen %	Aşınma Tabakası Tip-2 Limitleri * Toplam Geçen %
3/4"	19,1	100	100
1/2"	12,7	85	77-100
3/8"	9,52	76	66-84
No.4	4,76	56	44-66
No.10	2,00	32	30-50
No.40	0,42	13	12-28
No.80	0,177	8	7-18
No.200	0,074	5	4-10

Çizelge 4.2. Agregaların Yoğunlukları ve Su Emme Miktarları^φ

Agregas Sınıfı	Zahiri Özgül Ağırlık	Hacim Özgül Ağırlık	Absorbsiyon Yüzdesi,%
Kaba Agregas	2,706	2,682	0,326
İnce Agregas	2,735	2,667	0,932
Filler	2,786	-	-

* Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnaması, 1994

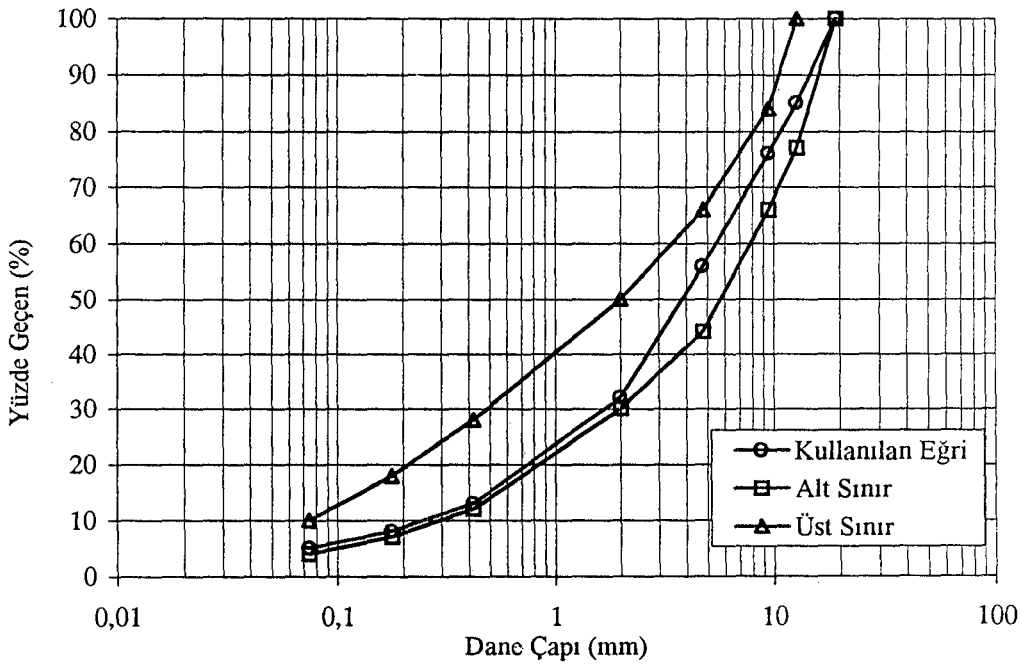
^φ Deneyler Ek 1’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kaba Agreganın Bazı Fiziksel Özellikleri

Özellikler	Agregaya ait Değerler		Aşınma Tabakasında Kullanılan Agregalimitleri ^a
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	24 ¹		30
Donma-Çözülme Dayanımı (Na ₂ SO ₄ ile kayıp miktarı, %)	1,0 ¹		10
Yassılık İndeksi (%)	11 ²		30
Su Absorbsiyonu (%)	0,326 ²		2
Soyulma Mukavemeti (%)	AC (60-70) ^c	AC (150-200) ^b	50
	55-60 ¹	50-55 ¹	

^c AC (60-70) : 60-70 Penetrasyonlu asfalt çimentosu (bitüm)

^b AC (150-200) : 150-200 Penetrasyonlu asfalt çimentosu (Bitüm)



Şekil 4.1. Agreganın Gronülometri Eğrisi

^a T.C.Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karatolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnaması, 1994

¹ T.C.Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karatolları Genel Müdürlüğü, 4. Bölge tarafından hazırlanan rapordan alınmıştır.

² Deneyler Ek1'de verilmiştir.

4.2. Bağlayıcı (Asfalt Çimentosu, Bitüm)

Asfalt betonu kaplamalarda bağlayıcı olarak AC 60/70 (60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu) ve AC 75/100 (75/100 penetrasyonlu asfalt çimentosu) kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bağlayıcı olarak Eskişehir Büyükşehir Belediyesi, Asfalt Şantiyesi'nden temin edilen, 75/100 penetrasyonlu orijinal asfalt çimentosu (bitüm) kullanılmıştır. Asfalt çimentosuna ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Asfalt Çimentosunun Bazı Fiziksel Özellikleri¹

Özellikler	Değerler
Penetrasyon	83
Yumaşama Noktası (°C)	45
Düktilite (cm)	100+
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1,024

4.3. Bitümün Yüzdesi Olarak İlave Edilen Malzemeler

4.3.1. Lastik parçaları

Bu çalışmada, kullanılan lastik parçaları hurda kamyon ve otomobil lastiklerin sürtünme yüzeylerindeki kısmın parçalanmasıyla elde edilmiştir. Bu lastikler, oto lastik kaplamacısı olan "Sayın Lastik" tarafından temin edilmiştir. Lastik parçaların hacim özgül ağırlığı 1,11 olarak bulunmuştur. Otomobil lastiklerin durabilitesini artırmak için içerisine karbon siyahı katılmaktadır.

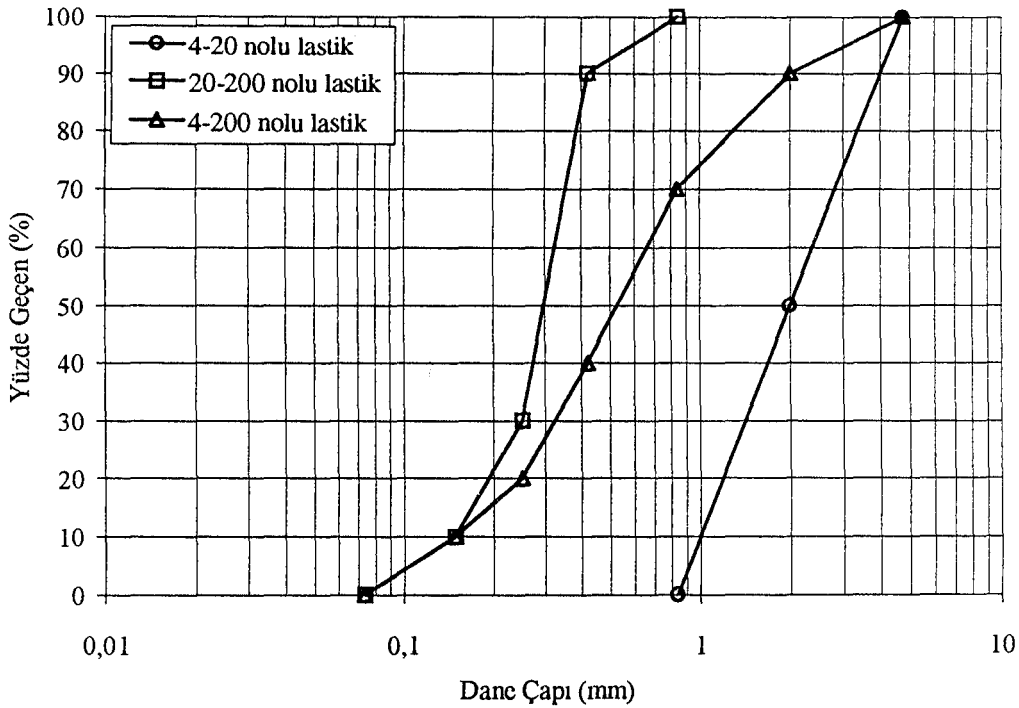
Lastik boyutunun asfalt kaplamalar üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla 4-20, 20-200 ve 4-200 nolu elekler arasında kalan 3 tip lastik boyutu kullanılmıştır. Her bir lastik gradasyonu için, kullanılan asfalt çimentosu ağırlığının %5'i, %10'u ve %20'si olarak lastik ilavesi yapılmıştır. Kullanılan lastik parçalarının gradasyon değerleri Çizelge 4.5'de, gronülometri eğrileri ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

¹ T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karatolları Genel Müdürlüğü, 4. Bölge tarafından hazırlanan rapordan alınmıştır.

Al-Abdul-Wahhab ve Al-Amri [7], lastik parçalarını bitüm ağırlığının %10'u, %20'si ve %30'u oranında karıştırmıştır. Khedaywi vd.[8], lastik paçalarını bitüm ağırlığının %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si olarak kullanmıştır. Heitzman [9], 80 nolu elekten geçen lastik parçalarını bitüm miktarının %0-%21 arasında değişen oranlarda bitümle karıştırmıştır. Stroup-Gardiner vd.[16], lastik paçalarını bitüm ağırlığının %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si olarak asfalt çimentosuyla karıştırmıştır.

Çizelge 4.5. Kullanılan Lastik Parçaların Gradasyon Değerleri

Elek No	Yüzde Geçen (%)			
	Elek Boyutu	No.4-20 Lastik	No.20-200 Lastik	No.4-200 Lastik
No.4	4,76	50	-	100
No.10	2,00	50	-	90
No.20	0,84	-	100	70
No.40	0,42	-	90	40
No.60	0,250	-	30	20
No.100	0,149	-	10	10
No.200	0,074	-	-	-



Şekil 4.2. Lastik Parçalarına ait Granülometri Eğrileri

4.3.2. Plastik parçaları

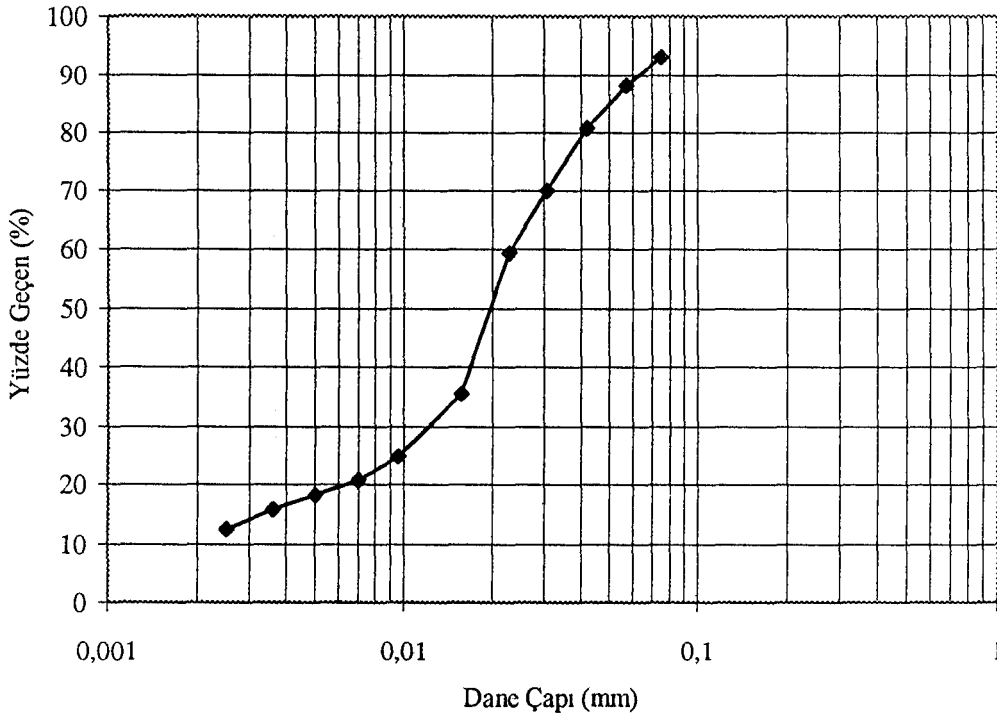
Endüstriyel ve evsel atıklar içinde plastik atıkların miktarı önemli denebilecek ölçüdedir. Burada, polietilen ürünü olan plastik atıkların asfalt kaplamalarına etkileri araştırılmıştır. 4-10 nolu elek boyutundaki plastik parçaları kullanılmıştır. Plastikler, “Akcan Plastik” işletmesinden temin edilmiştir. Bunlar, polietilen esaslı termoplastiktir.

Polietilenler, genellikle tokluk ve esneklik, düşük sürtünme katsayısı, sıfıra yakın nem emme, fevkalade elektriksel ve kimyasal özellikleri olan ve kolay işlenebilen reçinelerdir. Çalışma sıcaklıkları -4.5°C ile $+90^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Polietilenler yüksek zorlama ve sıcaklıklara maruz kalan makina elemanları yapımında kullanılmaz. Bunlar daha çok bavul, şişe, kap, bidon, torba ve mutfak eşyalarında kullanılır (4).

4.4. Filler Malzemesi Olarak İlave Edilen Malzemeler

4.4.1. Kül (Fly ash)

Bu malzeme, Çayırhan Termoelektrik Santralinden temin edilmiştir. Koyu kahve renkli ve küresel taneciklidir. Hacim özgül ağırlığı 2,33 olarak bulunmuştur. Bu malzemenin gronülometri eğrisi Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu çalışmada , kül filler malzemesiyle yer değiştirilmiştir. Bu malzemenin, 200 nolu elek altına geçen kısmından %5 oranında kullanılmıştır. Kül, bir çok ülkede zemin stabilizasyonunda, tuğla ve hafif agrega imalinde ve çimento üretiminde kullanılmasına rağmen ülkemizde yeterince değerlendirilememektedir.



Şekil 4.3. Kül'e ait Granülometri Eğrisi

4.4.2. Petrollü sondaj atıkları

Petrollü sondaj atıklar, asfalt betonu içerisinde filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, kullanılan sondaj atıkların bazı özellikleri Çizelge 4.6 granülometri eğrisi ise Şekil 4.4'de verilmiştir.

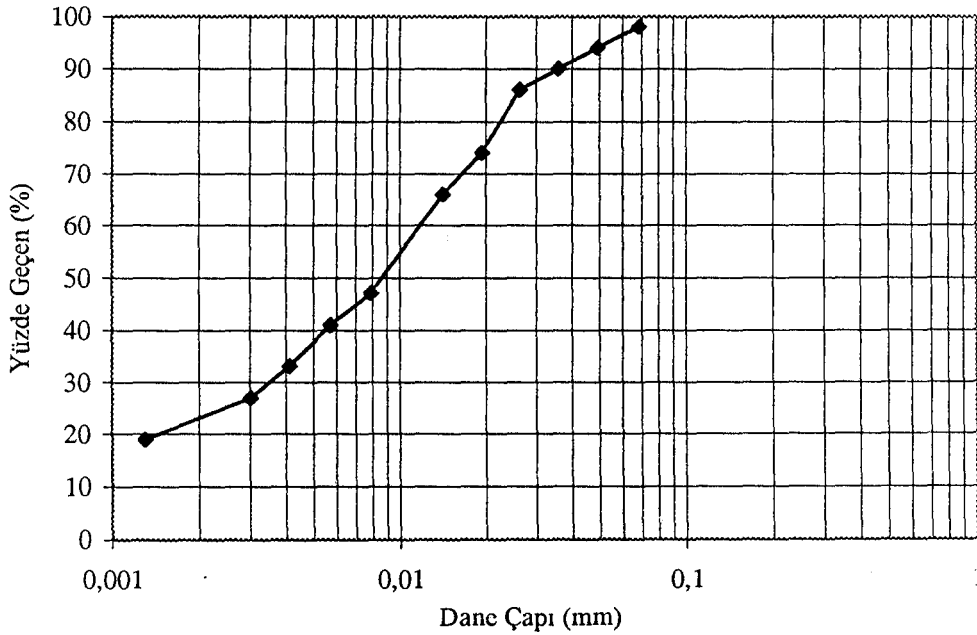
Petrol sondaj çalışmalarında ortaya çıkan çamur "sondaj çamuru" olarak adlandırılır. Sondaj çamuru, delgi matkabını soğutmak, temizlemek ve yağlamak, sondaj kesintilerini aşağıdan yukarıya çıkarmak ve yeraltı basıncını kontrol etmek için kullanılır. Bu çamur su ağırlıklı (water-base), yağ ağırlıklı (oil-base) ve özel çamur olarak sınıflandırılabilir. Su ağırlıklı sondaj çamurunda tuzlu su sıvı olarak kullanılır. Yağ ağırlıklı çamurda ise, genellikle dizel yağı (mazot) yağ ortamı olarak kullanılır. Fakat su ağırlıklı çamur düşük maliyetinden dolayı daha çok tercih edilmektedir. Su ağırlıklı sıvılara karşı hassas olan formasyon durumu gibi özel durumlarda yağ ağırlıklı çamurlar kullanılmaktadır. Özel çamurda ise hava veya gaz kullanılabilir. İlk iki çamur genellikle yaygın olarak kullanılmaktadır. Petrol sondaj çamuru ve atıkları; yağ, yüksek miktarda

klorit, barit, bentonit kili, kostik (NaOH), carboxy methlyl cellulose (CMC) ve diğ er ağır metalleri iç ermektedir. Barit, atık iç inde en küçük ç özünürlüğ e sahiptir. Baryum ve klorit biyolojik olarak ilerlemeyi etkileyen en önemli iki parametredir. Klorit miktarının toprakta artması, oil hareketinin atık iç erisinde ilerlemesini azaltmaktadır [6].

Asfalt betonunda kullanılan ince ve filler malzemenin plastik özelliğ e olmaması ve organik malzeme iç ermemesi istenmektedir. Bu ç alışmada kullanılan petrollü sondaj atıkları plastik özelliğ e sahip olmamakla beraber %2,00-2,40 civarında organik madde iç ermektedir. Hacim özgül ağı rlığ ı 2,66 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, büyük kısmını bentonit kilinin oluşturduğ u bu malzemenin 200 nolu elek altına geç en kısmı, agrega harmanının iç erisinde %5'lik kısmını oluşturan taştozu (filler) ile yerdeğ iştirdi. Sıkıştırılmış Marshall numunesinin üzerindeki etkiler incelenmiştir.

Ç izelge 4.6. Petrollü sondaj Atıklarına ait Bazı Özellikler¹

Su Muhtevası (%)	50-55
Organik madde miktarı (%)	2,00-2,40
Oil miktarı (%)	2,25-2,50
pH Değ eri	6,5-7,0



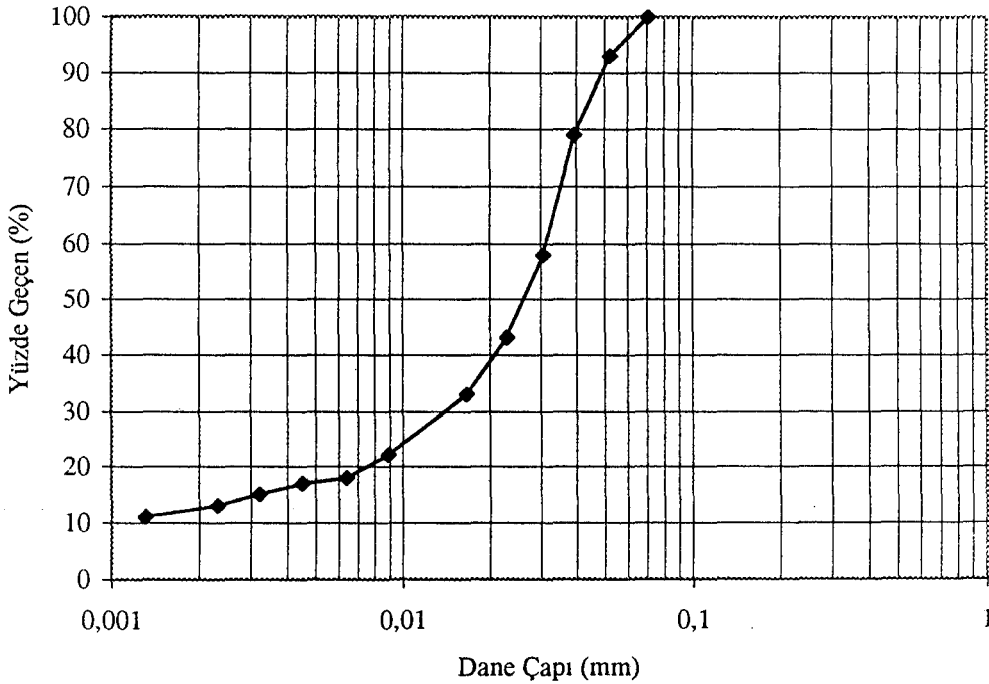
Ş ekil 4.4. Petrollü Sondaj Atığı'na ait Granüloметри Eğ risi

¹ TUNCAN vd., Petrollü Sondaj Atıkların Yol Malzemesi Olarak değ erlendirilmesi, 1996

4.4.3. Mermer tozu

Mermer, kalker ve dolomit kalkerlerin ısı ve basınç altında uğrayarak kristalleşmesi sonucu oluşmuş metamorfik bir kayadır. Kalsit kristalinden oluşan mermerin kimyasal birleşiminde, büyük oranlarda kalsiyum karbonat (Ca CO_3) ve silisyum dioksit (SiO_2) pigment olarak değişik metal oksitleri içermektedir. Bu malzeme, kireç gibi Ca CO_3 kaynağı sayılmaktadır. İçerisinde az miktarda kuvars, feldispat, pirit, mika, fluorit, demiroksit, manganoksit ve organik maddeler bulunmaktadır. Organik madde içeriği %1,5 civarındadır. Kireçtaşına benzeyen kimyasal kompozisyonuna rağmen daha kristalimsi bir yapıya sahip olup serttir. Çoğunlukla kalsiyum karbonat bileşimindeki mermerin kesilmesi sırasında oluşan toz, hayvan yemleri yapımı ve tarımda toprağın kalsiyum karbonatını artırıcı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. İnsan sağlığına zarar veren bileşikleri içermemesine rağmen mermer, ülkemizde çevre sağlığı açısından önlem alınması gereken sanayi atıkları arasındadır.

Çalışmada, 200 nolu elek altına geçen mermer tozları kullanılmıştır. Mermer tozunun hacim özgül ağırlığı 2,72 olarak belirlenmiş ve granülometri eğrisi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Mermer Tozu'na ait Granülometri Eğrisi

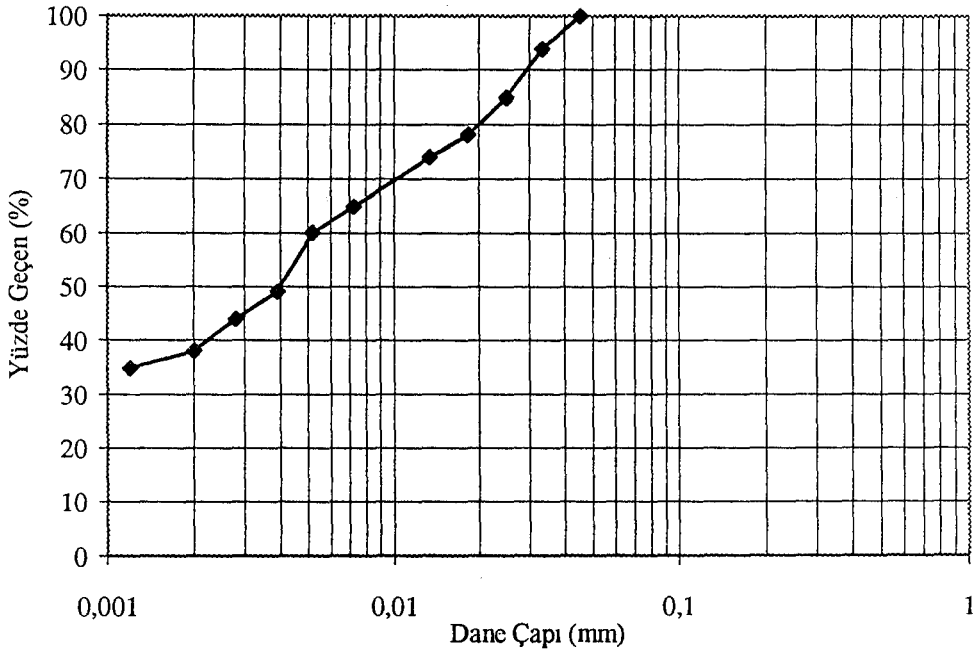
4.4.4. Lastik Parçaları

Çalışmanın bu bölümünde, kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen lastik tozların filler malzemesi olarak kullanılması düşünülmüştür. 100 ile 200 nolu elek arasında kalan lastik tozları agreganın %5'lik kısmını oluşturan taştuzu ile yer değiştirilmiştir.

4.4.5. Portland Çimentosu

Portland çimentosu, klinkerin alçı taşı ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ve %10 miktarında herhangi bir doğal ya da yapay bir puzolonik madde ile karıştırılarak öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimentoda aranan en önemli özelliklerden birisi inceliği, yani özgül yüzey alanıdır. Çimentonun aranan en önemli özelliklerden birisi olan inceliği, 2800-4000 cm^2/g 'dir. İncelik arttığında danelerin temas yüzeyi artar ve sertleşme daha çabuk gerçekleşir. Kullanılan çimentonun kimyasal birleşimi, %63 CaO, %22 SiO_2 , %6 Al_2O_3 , %3 Fe_2O_3 , %3 MgO ve diğer oksitleri içermektedir.

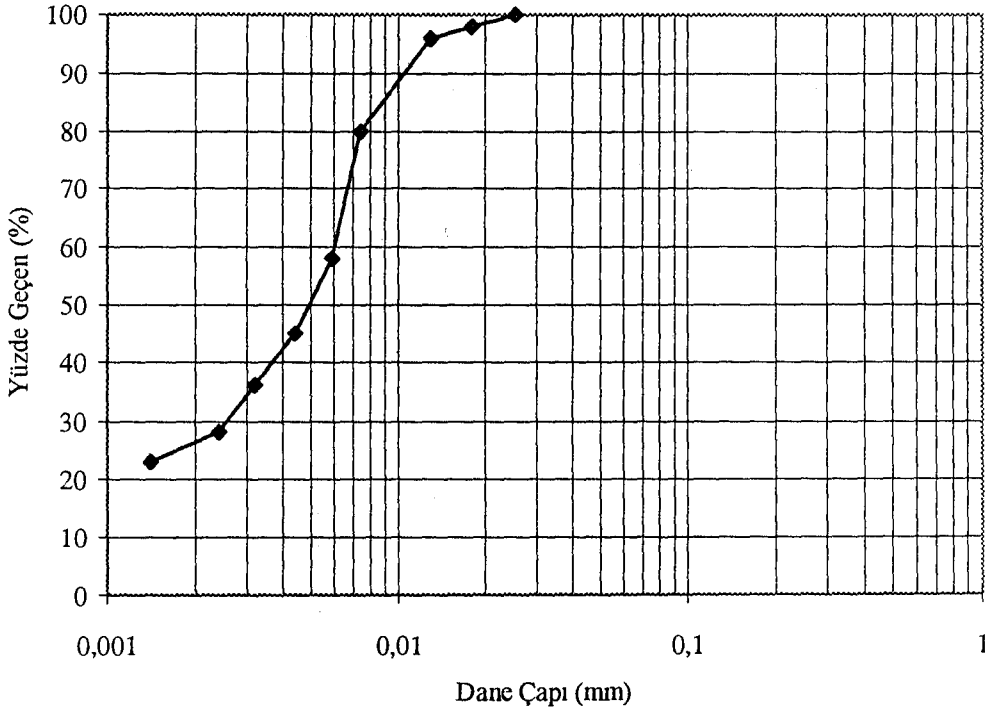
Bu çalışmada, 200 nolu elek altına geçen kısmı kullanılan çimentonun hacim özgül ağırlığı 2,83 olarak belirlenmiş ve granülometri eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Portland Çimentosu'na ait Granülometri Eğrisi

4.4.6. Kireç

Asfalt betonu-aşınma tabakasında kullanılan filler malzemelerinden biriside kireçtir. Kirecin, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü yollar fenni şartnamesinde filler malzemesi olarak kullanabileceği belirtilmiştir. Kullanılan kireç toz halinde, sönmüş ve yüksek miktarda kalsiyum içermektedir. Formülü $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir. Kullanılan kirecin hacim özgül ağırlığı 2,38'dir. Kirecin granülometri eğrisi Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Sönmüş Kireç'e ait Granülometri Eğrisi

* Bu bölümde belirtilen filler malzemelerinin hacim özgül ağırlıkları ASTM C 854'e göre belirlenmiştir.

5. DENEY METODLARI

5.1. Lastik ve Plastik İlaveli Bağlayıcıların Hazırlanması

Lastik ve plastik parçaları bitüm ile ağırlığın %5'i, %10'u ve %20'si olarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında aşağıdaki yöntem uygulanmıştır [26].

- Asfalt çimentosu (bitüm) paslanmaz çelik kaplarda 160 ile 230 °C arasında ısıtıldı.
- Lastik ve plastik parçaları 160 °C'ye ulaşan asfalt çimentosu içerisine ilave edildi.
- Karışımın sıcaklığını muhafaza için kap sıcak bir plaka üzerine yerleştirildi.
Daha sonra, karıştırma kabı mikserle yerleştirilerek 500 rpm'lik hızda, homojen bir karışım elde edebilmek için 30-40 dakika karıştırıldı.
- Karıştırma işlemi sonunda elde edilen lastikli ve plastikli asfalt çimentoları asfalt beton numunelerin hazırlanmasında kullanıldı.

5.2. Deney Numunelerin Hazırlanması

Kullanılan granülometriye göre tartılarak tepsilere ayrılan 1150 g'lık agrega karışımı 160 °C sıcaklıktaki fırında 8 saat bekletildi. Daha sonra kuru agreganın yüzdesi olarak belirlenen asfalt çimentosu (bitüm) 145 °C'ye kadar ısıtılarak karıştırma kabına boşaltılan agregaya ilave edildi. Karıştırma kabı mikserle yerleştirilerek en az 2 dakika karıştırıldı (Şekil 5.1). Bu esnada karışımın sıcaklığının, sıkıştırma sıcaklığının altına düşmemesi için karıştırma kabı ısıtma plakası üzerine yerleştirildi. Karıştırma işleminden sonra kalıplara yerleştirilen karışım otomatik kompaktör kullanılarak sıkıştırıldı (Şekil 5.2). Numunelerin her iki yüzüne, ağır trafikli yollar ve otoyolların tasarımında kullanılan 75 vuruş uygulandı. Sıkıştırmadan sonra oda sıcaklığında korunan, 101.6 mm çapında ve 60-65 mm yüksekliğinde olan bu numuneler hidrolik bir numune çıkarıcı kullanılarak kalıplardan çıkarıldı (Şekil 5.3). Herbir karışım grubu için pratik özgül ağırlıkları birbirine yakın 3 adet numune hazırlanmıştır.

Bu numuneler açık havada oda sıcaklığında 7 gün süre ile kür edildi. Daha sonra numunelerin ASTM D 2726'ya göre [27] hacim özgül ağırlıkları belirlendi (Şekil 5.4).

Hacim özgül ağırlıkları belirlenen numuneler üzerinde Marshall stabilite, indirek çekme, serbest basınç ve su hasarı direnci deneyleri yapıldı.

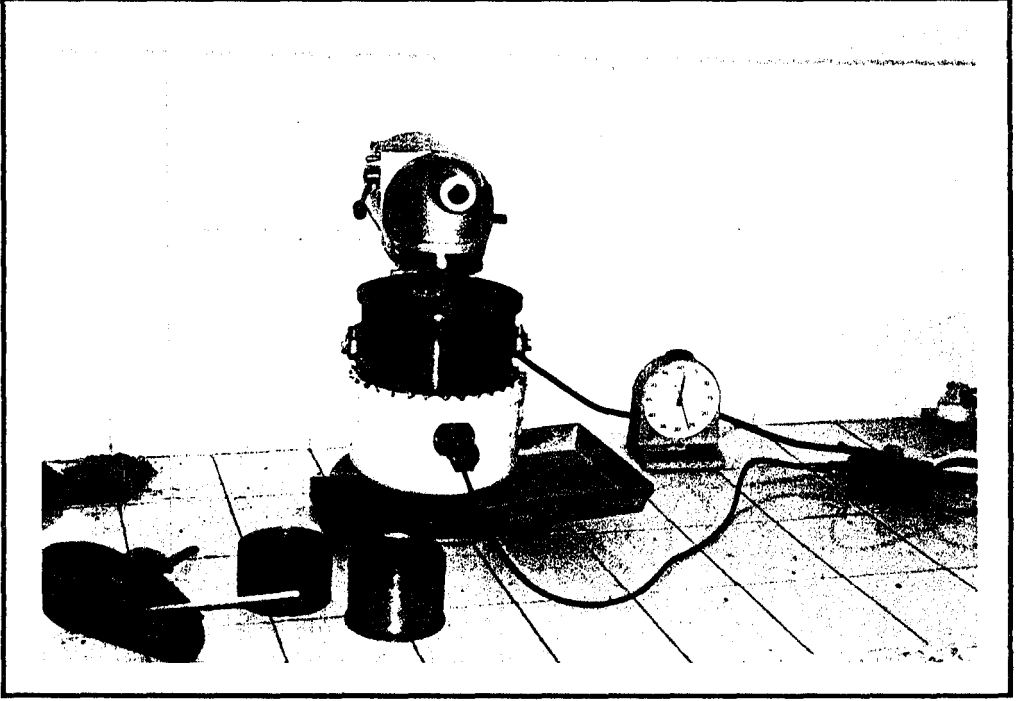
Serbest basınç deneyi için numuneler de aynı kalıplar kullanılarak hazırlanmıştır. Fakat, bu numunelerin boyları en az numune çapına eşit olması istendiğinden sıcak karışım iki aşamada sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma için, her bir yüze 75 darbe uygulanmıştır. Bu bölümde her bir karışım grubu için 2 adet numune hazırlanmıştır.

5.3. Sıkıştırılmış Kaplama Karışımının Hazırlanma Aşamaları ¹

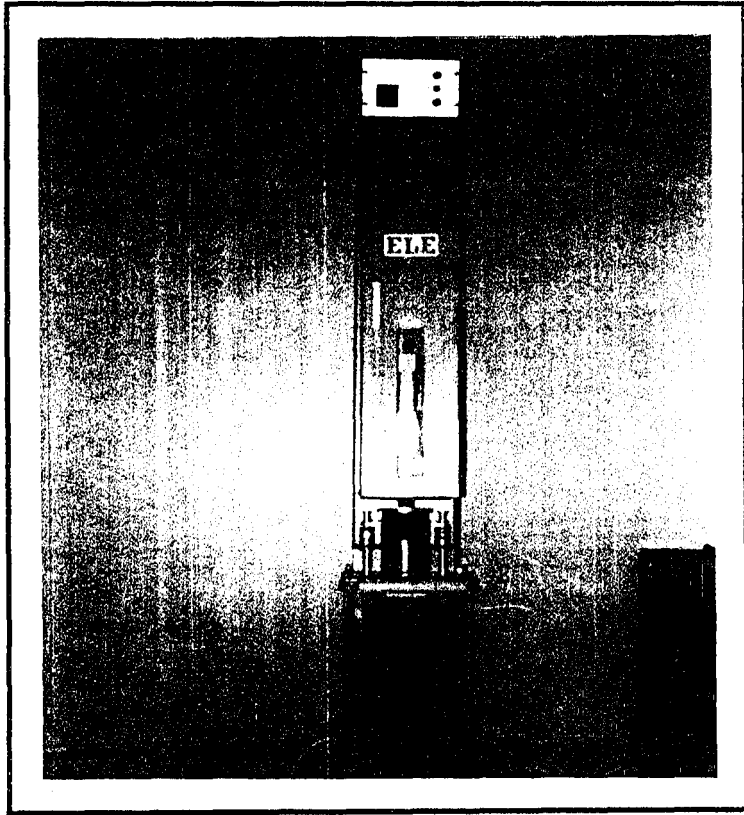
Marshall metoduna göre numunelerin hazırlanması ve hazırlanan numunelere ait bazı özelliklerin belirlenmesi için aşağıda belirtilen hususlar uygulanmalıdır.

1. Kaba agreganın (ASTM C 127'ye göre) ve ince agreganın (ASTM C 128'e göre) hacim özgül ağırlıkları bulunur.
2. Asfalt çimentosunun (ASTM D 70'e göre) ve fillerin (ASTM C 854'e göre) özgül ağırlığı bulunur.
3. Kaplama karışımı içindeki agrega karışımının hacim özgül ağırlığı bulunur.
4. Gevşek kaplama karışımının (ASTM D 2041'e göre) maksimum özgül ağırlığı bulunur.
5. Sıkıştırılmış agrega karışımının (ASTM D 2726'ya göre) hacim özgül ağırlığı bulunur.
6. Agreganın efektif özgül ağırlığı bulunur.
7. Agreganın bitüm absorpsiyonu bulunur.
8. Kaplama karışımının efektif bitüm miktarı bulunur.
9. Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) bulunur.
10. Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu yüzdesi bulunur.
11. Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki asfaltla dolu boşluk yüzdesi bulunur.

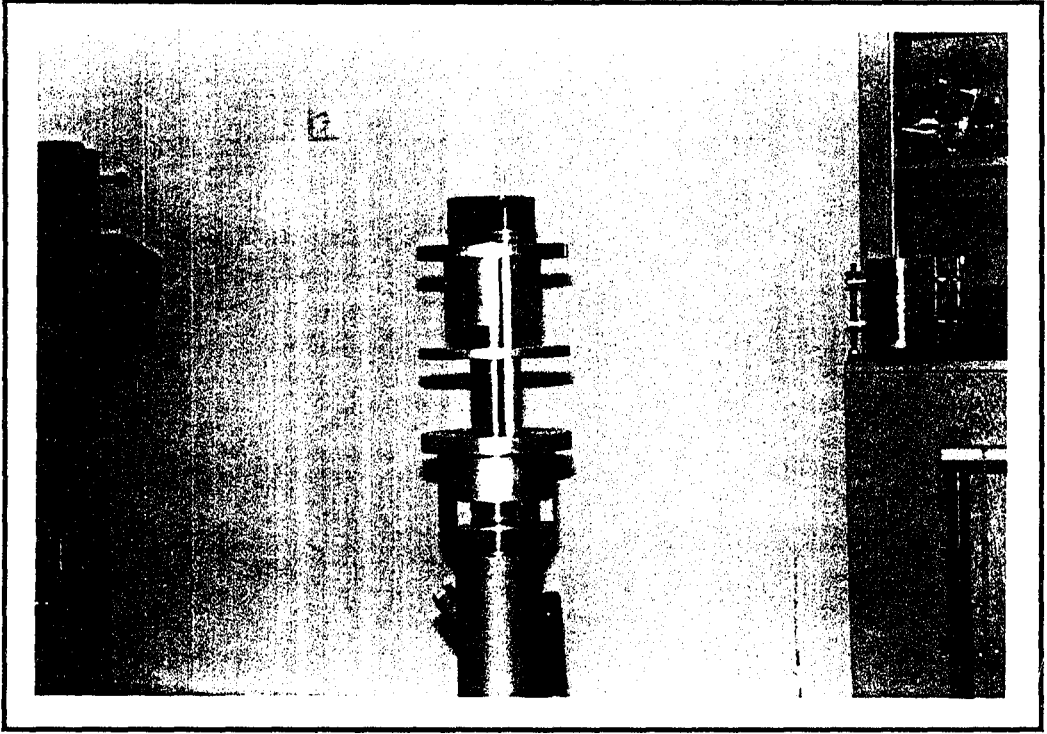
¹ Önal ve Kahramangil, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, 1993



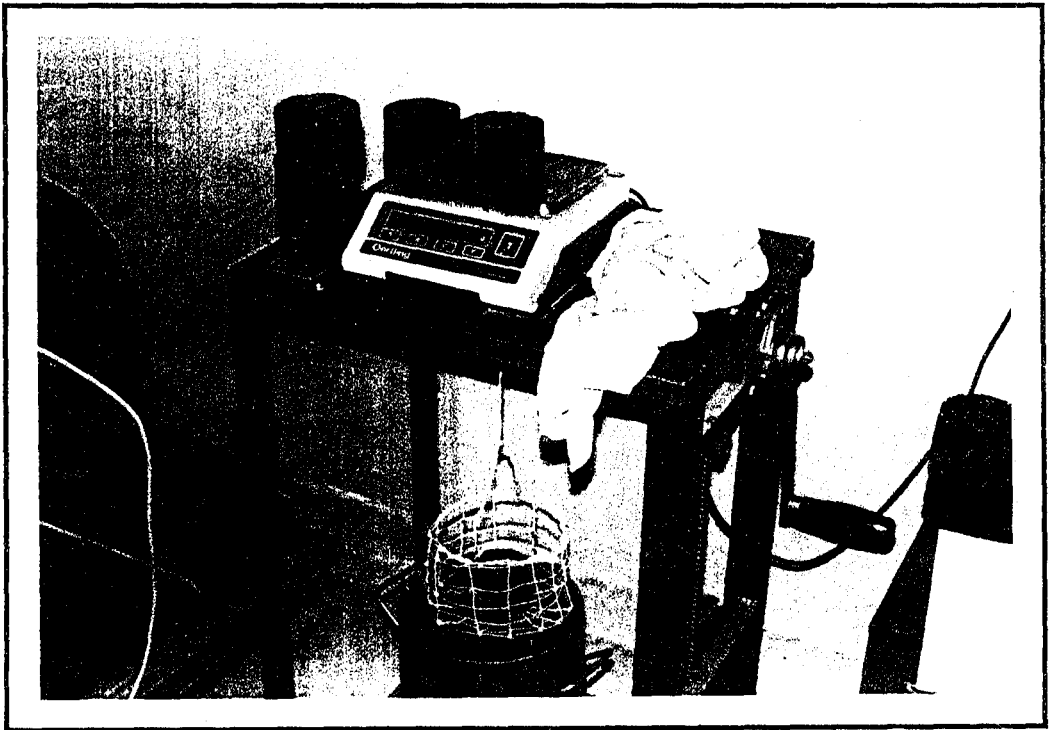
Şekil 5.1. Karışım Hazırlanmasında Kullanılan Mikser



Şekil 5.2. Marshall Numune Sıkıştırıcısı



Şekil 5.3. Hidrolik Numune Çıkartıcı

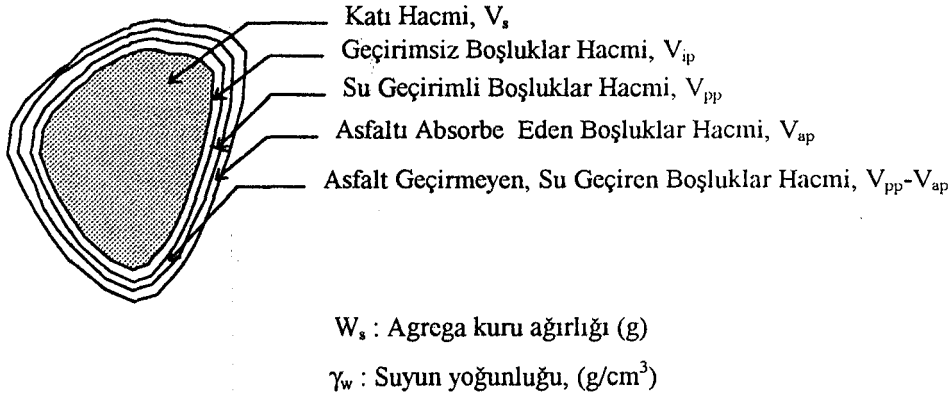


Şekil 5.4. Hacim Özgöl Ağırlığının Belirlenmesi için Gerekli Aletler

5.3.1. Agreganın özgül ağırlık ve absorpsiyonun tayini

Bir agreganın özgül ağırlığı, o agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 20-25 °C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Danenin hacim tanımlamasına bağlı olarak, üç adet özgül ağırlık tipi mevcuttur.

1. Zahirî özgül ağırlık
2. Hacim özgül ağırlık
3. Efektif özgül ağırlık



Şekil 5.5. Agreganın Danesinin Farklı Özgül Ağırlıkları Arasındaki İlişki
 (Önal ve Kahramangil, 1993)

Şekil 5.5 gözönüne alındığında, zahirî özgül ağırlık, geçirimsiz boşluklarla beraber katı dane hacmini kapsar.

$$\text{Zahirî Özgül Ağırlık } (G_{sa}) = \frac{W_s}{(V_s + V_{ip})\gamma_w} \quad (5.1)$$

Hacim Özgül Ağırlık, geçirimsiz ve geçirimli tüm boşluklarla beraber katı dane hacmini kapsar.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık } (G_{sb}) = \frac{W_s}{(V_s + V_{ip} + V_{pp})\gamma_w} \quad (5.2)$$

Efektif Özgül Ağırlık ise, asfalt absorbe eden boşluklar dışındaki tüm hacmi kapsar.

$$\text{Efektif Özgül Ağırlık (G}_{sc}\text{)} = \frac{W_s}{(V_s + V_{ip} + V_{pp} - V_{ap})\gamma_w} \quad (5.3)$$

Sıkıştırılmış asfalt kaplama tabakasındaki hava boşlukları, bitümle kaplanmış agrega daneleri arasında küçük hava cepleri şeklindedir. Asfalt karışım hesaplarında kullanılan agrega için seçilecek olan özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru olarak veren özgül ağırlık olmalıdır. Zahiri özgül ağırlık kullanıldığı zaman, asfaltın su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Eğer hacim özgül ağırlık kullanılırsa, asfaltın su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilmiş olur. Efektif özgül ağırlık kavramı, agrega tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından, sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu verecektir.

Asfalt absorpsiyonu çok küçük olan agregalarda, efektif özgül ağırlık yerine zahiri özgül ağırlığın kullanılması büyük bir hata getirmeyecektir.

5.3.1.1. Kaba agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlık tayini

ASTM C 127 metodu kullanılarak kaba agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı belirlenmiştir [28]. 4 nolu (4,75 mm) elek üzerinde kalan dane boyutundaki agrega kullanılmıştır. Agrega numunesinin karışım gradasyonunu temsil etmesine dikkat edilmelidir. Hazırlanan numune yıkanarak, su içinde 24 saat bekletilir. Su içinden çıkarılan numune emici özelliğe sahip olan bir bez üzerine yayılarak agrega daneleri teker teker kurulanır. Doygun yüzeyi kuru hale gelmiş olan agrega numunesi tartılır (B_k).

Tel sepete konulan agrega numunesinin 25 ± 1 °C sıcaklıktaki suda tartımı yapılır (C_k). Numune tel sepet içinden bir tepsiye boşaltılarak 110 ± 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune 1 ile 3 saat arasında oda sıcaklığında soğutulularak tartılır (A_k).

Özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlığı} = \frac{A_k}{(B_k - C_k)} \quad (5.4)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A_k}{(A_k \cdot C_k)} \quad (5.5)$$

$$\text{Absorpsiyon (\%)} = \frac{(B_k - A_k)}{A_k} \times 100 \quad (5.6)$$

Burada:

A_k : Kuru numune ağırlığı (g),

B_k : Doymun-yüzey kuru numune ağırlığı (g),

C_k : Doymun-yüzey kuru numunenin sudaki ağırlığı (g),

5.3.1.2. İnce agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlık tayini

ASTM C 128 metodu kullanılarak ince agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı belirlenmiştir [29]. Karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde en az 1000 g agrega kullanılmıştır. 200 nolu elekten yıkanan malzeme bir tepsi içine alınarak üzeri su ile kaplanır ve 24 saat bekletilir. Daha sonra ince malzeme kaybına neden olmayacak şekilde suyu süzülür ve absortif olmayan düzgün bir yüzey üzerine serilir.

Numuneyi doymun-yüzey kuru hale getirmek için sıcak hava akımı karşısında devamlı karıştırılarak kurutma işlemine tabi tutulur. Bu işleme malzeme serbest dökülebilir hale gelinceye kadar devam edilir. Bu anı tespit etmek için koni metodu uygulanır. Bu metod ekler kısmında verilmiştir.

Doymun-yüzey kuru hale gelen yaklaşık 500 g numune piknometre içine konularak tartılır (C_i). Üzerine numune yüzeyini kaplayacak seviyede su ilave edilir. Hava kabarcıkların çıkması için piknometre her iki yönde 15-20 dakika çalkalanır. Daha sonra

piknometrenin boş kısmı işaret çizgisine kadar su ile doldurulur. 25 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su ve malzeme sıcaklığı 25 °C'ye ulaştığında piknometre su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır (D_i). İnce agrega piknometreden bir tepsiye boşaltılır ve 110 ± 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune soğutularak tartılır (E_i).

İnce agreganın özgül ağırlık ve su absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlığı} = \frac{E_i}{(B_i - C_i) - (A_i - D_i)} \quad (5.7)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E_i}{(B_i + E_i - D_i)} \quad (5.8)$$

$$\text{Absorpsiyon (\%)} = \frac{(C_i - A_i - E_i)}{E_i} \times 100 \quad (5.9)$$

Burada:

A_i : Piknometre ağırlığı (g),

B_i : 25 °C 'deki su dolu piknometre ağırlığı (g),

C_i : Piknometre ve doymun-yüzey kuru numune ağırlığı (g),

D_i : 25 °C 'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g),

E_i : Kuru numune ağırlığı (g).

5.3.1.3. Mineral filler zahiri özgül ağırlık tayini

Filler malzemelerinin zahiri özgül ağırlıkları ASTM C 854 metodu kullanılarak belirlenmiştir [30]. 110 ± 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulan filler malzemesi şişenin üçte biri dolacak şekilde piknometrenin içerisine konularak tartılır (C_f). Piknometre yarısına kadar su doldurulur ve en az 5 dakika, yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan desikatör içinde bırakılarak havası alınır. Daha sonra piknometre tamamen su ile

doldurularak 25 ± 1 °C'lik su banyosunda 60 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılır ve kurularak tartılır (D_f). Fillerin zahiri özgül ağırlığı aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{C_f - A_f}{(B_f - A_f) - (D_f - C_f)} \quad (5.10)$$

Burada:

A_f : Piknometre ağırlığı (g),

B_f : Piknometre+su ağırlığı (g),

C_f : Piknometre+kuru numune ağırlığı (g),

D_f : Piknometre+kuru numune+su ağırlığı (g).

Kaba agrega, ince agrega ve mineral fillere ait su absorpsiyon ve özgül ağırlık deneyler ekler bölümünde verilmiştir. Ayrıca, deney sonuçları malzemeler bölümünde Çizelge 4.2'de verilmiştir.

5.3.2. Asfalt çimentosunun özgül ağırlığının tayini

ASTM D 70 metodu kullanılarak asfalt çimentosunun (bitüm) özgül ağırlığı belirlenmiştir [31]. Yüksek viskoziteli katran ve asfaltın özgül ağırlığının belirlenmesi için piknometre yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, ilk olarak piknometrenin kalibrasyonu yapılır. Asfalt çimentosu buharlaşma kaybına uğramadan yavaş yavaş ısıtılır ve yaklaşık piknometrenin yarısına kadar doldurulur. Piknometre hafifçe ısıtılır ve oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar soğumaya bırakılarak tartılır. Daha sonra piknometrenin kalan kısmı su ile doldurulur. 25 ± 1 °C'lik su bayosunda enaz 40 dakika bekletildikten sonra temiz bir bezle kurularak tartılır (Şekil 5.6).

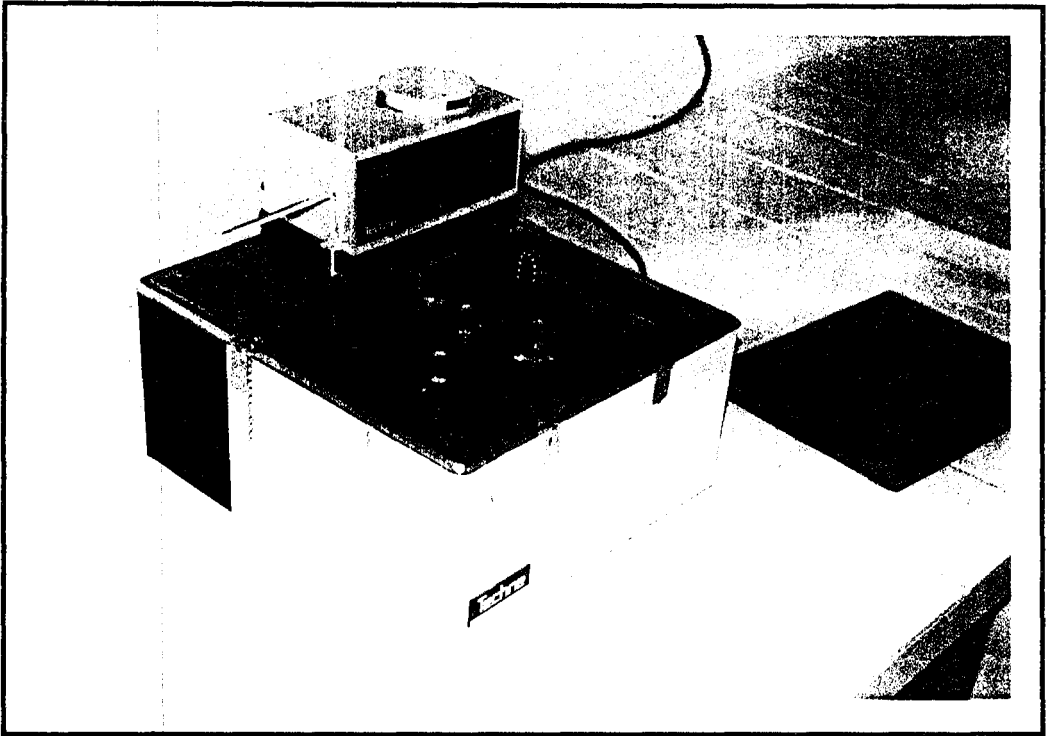
Asfalt çimentosunun (bitüm) özgül ağırlığı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Özgül Ağırlık } (G_s) = \frac{c - a}{(b - a) - (d - a)} \quad (5.11)$$

Burada:

- a : Piknometre ağırlığı (g),
- b : Piknometre+su ağırlığı (g),
- c : Piknometre+bitüm ağırlığı (g),
- d : Piknometre+bitüm+su ağırlığı (g).

Bu çalışmada kullanılan bitümün özgül ağırlık deneyi sonuçları malzemeler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.6. Su Banyosunda Bekletilen Bitüm Numuneleri

5.3.3. Agrega karışımının özgül ağırlığının tayini

Agrega karışımı, herbiri değişik özgül ağırlıklara sahip kaba agreg, ince agreg ve mineral fillerden oluştuğundan, toplam agreganın hacim veya zahiri özgül ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{sb} = \frac{\% K + \% I + \% F}{\frac{\% K}{G_{kb}} + \frac{\% I}{G_{ib}} + \frac{\% F}{G_{fa}}} \quad (5.12)$$

$$G_{sa} = \frac{\% K + \% I + \% F}{\frac{\% K}{G_{ka}} + \frac{\% I}{G_{ia}} + \frac{\% F}{G_{fa}}} \quad (5.13)$$

Burada:

- G_{sb} : Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı
- G_{sa} : Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı
- $\% K, \% I, \% F$: Agregaların ağırlıkça yüzdeleri
- G_{kb}, G_{ib} : Agregaların hacim özgül ağırlıkları
- G_{ka}, G_{ia}, G_{fa} : Agregaların zahiri özgül ağırlıkları

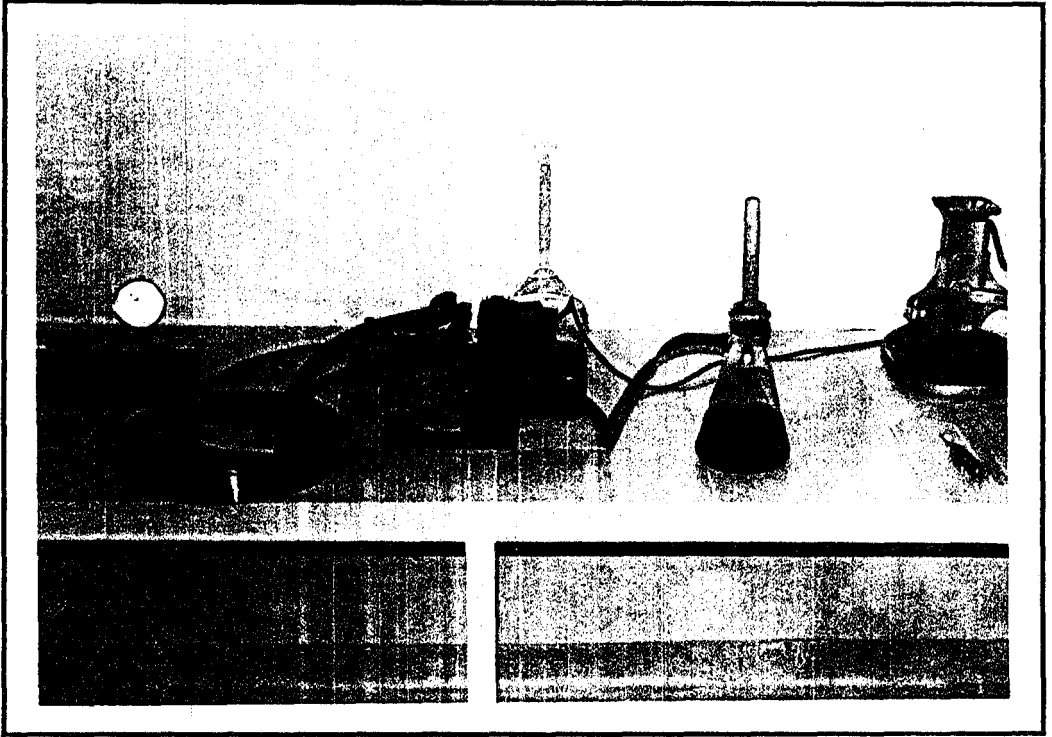
5.3.4. Bitümlü kaplama karışımların maksimum teorik özgül ağırlığının tayini

Maksimum teorik özgül ağırlık, 25 °C'deki malzeme kütlesinin malzemeye eşit hacimdeki ve aynı sıcaklıktaki suyun kütlesine oranıdır. ASTM D 2041 metodu uygulanarak belirlenmiştir [32]. Agrega karışım gradasyonuna uygun olarak tartılıp hazırlanır ve Marshall yöntemine göre ısıtılarak bitümlü karıştırılır. Bitümlü karışım numunesi, taneleri kırmamaya özen göstererek ve ince agregadan oluşan topakların boyutu 6.4 mm'den küçük olacak şekilde elle tanelenerek ayrılır. Bu karışım piknometreye konularak tartılır (C). Piknometre içine malzemenin üstü su ile örtülecek şekilde su ilave edilir. Piknometreye içindeki hava alınıncaya kadar vakum uygulanır (Şekil 4.7). Daha sonra piknometrenin tamamı su ile doldurularak 25±1 °C'ye ayarlı su banyosunda bekletilir. Malzeme ve suyun sıcaklığı 25 °C'ye ulaştığında piknometre kurularak tartılır (D). Bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$D_T = \frac{C_t - A_t}{(C_t - A_t) - (D_t - B_t)} \quad (5.14)$$

Burada:

- A_t : Piknometrenin boş ağırlığı (g),
- B_t : 25 °C'deki su dolu piknometre ağırlığı (g),
- C_t : Piknometre+numune ağırlığı (g),
- D_t : 25 °C'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g).



Şekil 5.7. Gevşek Kaplama Karışıma Vakum Uygulaması

5.3.5. Sıkıştırılmış bitümlü kaplama karışımların hacim özgül ağırlığının tayini

ASTM D 2041 metodu uygulanarak kullanılmıştır [32]. Bu metod ile tayin edilen özgül ağırlık, 25 °C'de malzemenin geçirimli ve geçirimsiz boşluklarını içeren hacminin

kütlesinin, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun kütlesine oranı olarak tanımlanır. Yoğunluk ise, 25 °C'deki malzemenin, birim hacminin kütlesidir.

Bu yöntem, laboratuvarda hazırlanmış bitümlü karışım biriketlerine veya yola serilip sıkıştırılmış bitümlü karışım kaplamalardan alınan numunelere uygulanabilir.

Oda sıcaklığında bekletilen numuneler tartılır (A). Numuneler 25±1 °C'lik su içerisine daldırılır ve 3-5 dakika bekletilerek tartılır (C). Sudan çıkan numunelerin yüzeyi nemli bir havlu ile çabucak kurularak tartılır (B).

Numunenin hacim özgül ağırlığı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlığı (D}_p\text{)} = \frac{A}{B - C} \quad (5.15)$$

Burada:

- A : Kuru numunenin ağırlığı (g),
- B : Doygun-yüzey kuru numune ağırlığı (g),
- C : Numunenin sudaki ağırlığı (g).

Numunenin absorbe ettiği su yüzdesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Absorpsiyon (\%)} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (5.16)$$

Eğer numunenin su absorpsiyonu numune hacminin %2'sinden fazla ise hacim özgül ağırlığı deneyi, parafinle kaplama yöntemi uygulanarak yapılır. Bu çalışmada hazırlanan numunelerin absorpsiyon yüzdesi, bu değerden küçük olduğu için yukarıda bahsedilen yöntem seçilmiştir.

5.3.6. Agreg a efektif özgül ağırlığın tayini

Agrega tarafından absorbe edilen asfalt hacmi, absorbe edilen suyun hacminden daha azdır. Bunun sonucu olarak agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Efektif özgül ağırlık bu limitlerin dışına

düştüğünde değerin yanlış olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda ASTM D 2041'e göre yapılan teorik özgül ağırlık deneyi yeniden gözden geçirilmelidir. Bu deneyin yapılamadığı durumlarda, hacim özgül ağırlık ve zahiri özgül ağırlık değerlerin ortalaması alınarak bulunan efektif özgül ağırlık değeri hesaplarda kullanılabilir.

Agreganın efektif özgül ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_T} - \frac{W_a}{G_b}} \quad (5.17)$$

Burada:

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı (asfalt absorbe eden boşluklar hariç tüm boşlukları içerir).

W_a : Agreganın yüzdesi olarak bitüm

D_T : Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

G_b : Bitüm özgül ağırlığı

5.3.7. Bitüm absorpsiyon yüzdesinin hesaplanması

Bitüm absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{ef}} \times G_b \quad (5.18)$$

Burada:

P_{ba} : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak, absorbe edilen bitüm

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı

G_b : Bitüm özgül ağırlığı

5.3.8. Kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması

Efektif bitüm yüzdesi, toplam bitüm miktarının agregaya tarafından absorbe edilen bitüm miktarı kadar eksiktir. Bu, toplam bitüm miktarının agregaya dışını kaplayan kısmıdır ve kaplama karışımının performansına etki edecek bitüm miktarıdır.

$$P_{bc} = W_a - P_{ba} \quad (5.19)$$

Burada:

P_{bc} : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı

W_a : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

P_{ba} : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm

5.3.9. Farklı bitüm miktarlarında hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığının tayini

Herbir bitüm yüzdesindeki hava boşluğu hesaplanırken, farklı bitüm yüzdesindeki maksimum özgül ağırlığa ihtiyaç duyulur. ASTM D 2041'e göre deney yapılırken en sağlıklı sonucu alabilmek için optimuma yakın bitüm yüzdesinde hazırlanmalı ve D_T için iki veya üç deney yapılmasına çalışılmalıdır.

Bitüm miktarının değişmesi bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmez, bu sebeple maksimum özgül ağırlık, D_T , aşağıdaki formül ile her bitüm yüzdesi için ayrı ayrı hesaplanabilir.

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (5.20)$$

Burada:

D_T : Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

W_a : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b : Bitüm özgül ağırlığı

5.3.10. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki agregalar arası boşluk (vma) yüzdesi tayini

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımın agregada daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır, ve toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanır.

VMA, agreganın hacim özgül ağırlığı esas alınarak hesaplanır ve sıkıştırılmış kaplama karışım hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. Böylece VMA, sıkıştırılmış kaplama karışımın hacminden agreganın hacim özgül ağırlığı ile hesaplanan hacmin çıkarılmasıyla hesaplanır. Eğer karışım kompozisyonu agregada ağırlığının yüzdesi olarak bulunmuşsa,

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \quad (5.21)$$

Burada:

- VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi
- D_p : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
- G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı
- W_a : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

5.3.11. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu (V_h), bitümlle kaplanmış agregada daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir.

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (5.22)$$

Burada:

- V_h : Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu
 D_T : Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı
 D_p : Sıkıştırılmış karışımının (briketin) hacim özgül ağırlığı

Asfaltla dolu boşluk (V_f), sıkıştırılmış kaplama karışımın bitümlü dolan boşluklarını içerir.

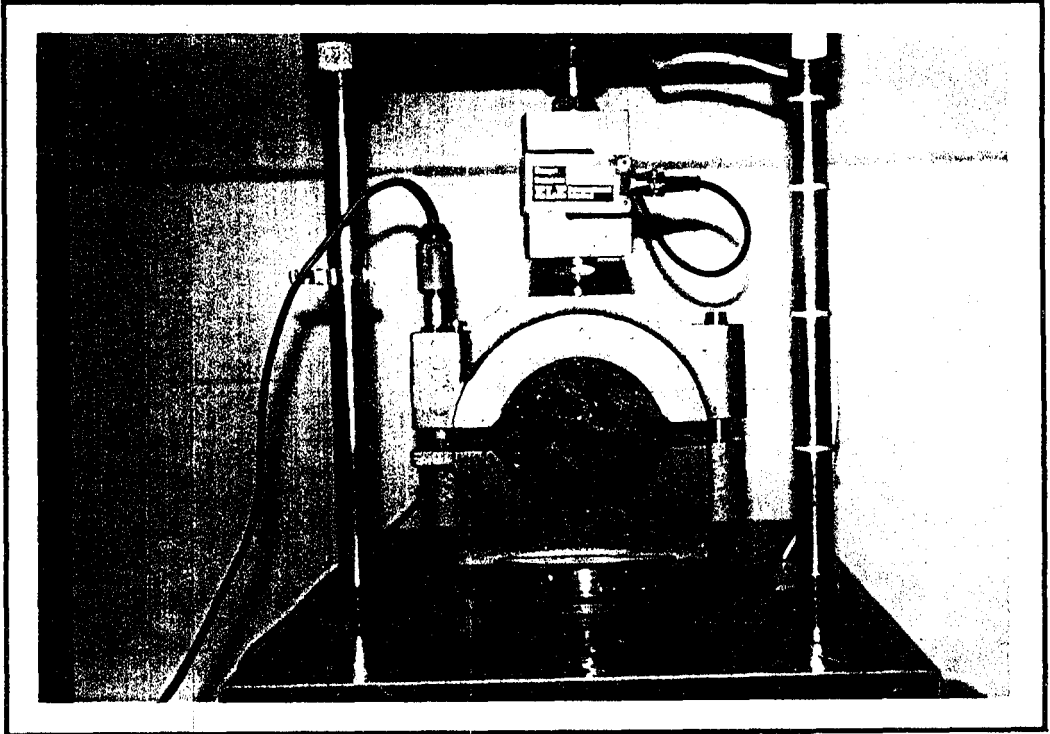
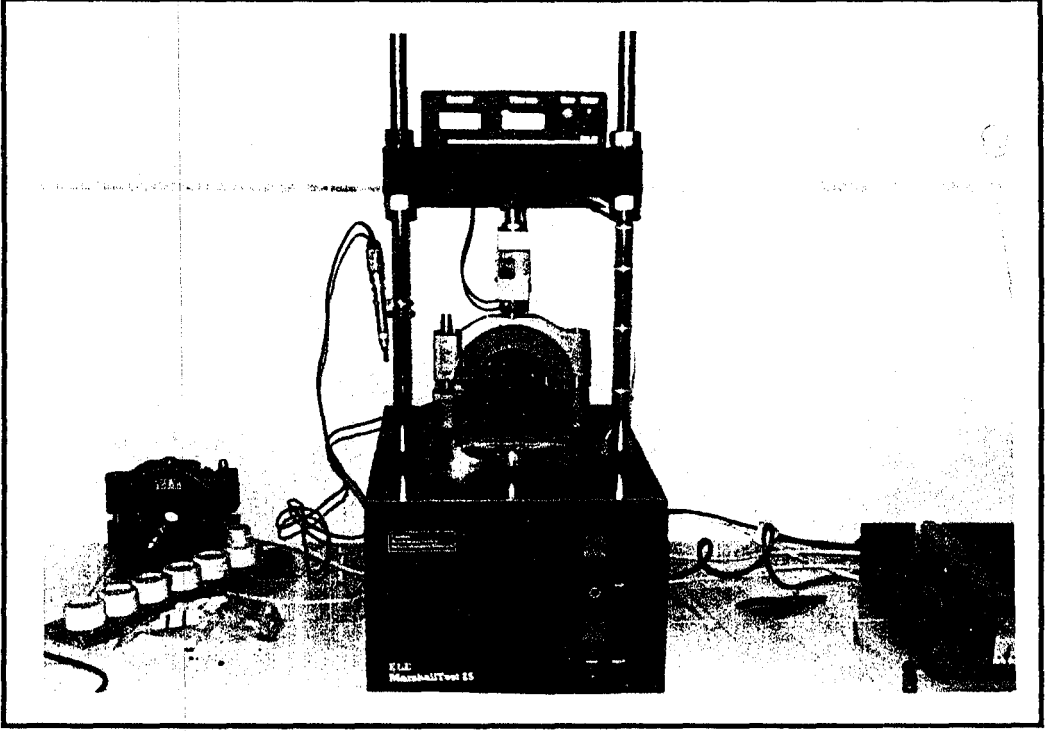
$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (5.23)$$

Burada:

- V_f : Asfaltla dolu boşluk
 VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi
 V_h : Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu

5.4. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Halen Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından kaplama tasarımında kullanılan bu deney ASTM D 1559'a göre uygulanmıştır [33]. Numuneler bu metoda uygun olarak hazırlanmıştır. Bu metod, Marshall aleti yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yapılarak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsamaktadır. Marshall numuneleri her iki yüzeye 75'er darbe vurularak hazırlanmıştır. ASTM D 2726'ya göre [27] yoğunlukları belirlenen briketler 60 °C'lik su banyosunda 30 ile 40 dakika bekletildikten sonra, 50.8 mm/dak yerdeğiştirme hızına sahip Marshall test aletinde 30 saniye içerisinde test edilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Marshall Deney Aleti

5.5 İndirek Çekme Deneyi

Karışımların çekme dayanımlarını belirlemek için statik yarma silindiri (Brazilian) testi olarak bilinen AASHTO T-283'te belirtilen indirekt çekme deney metodu uygulanmıştır [30]. Silindirik Marshall numunesi boyutundaki numuneler 25 °C'lik su banyosunda 2 saat bekletilmiştir (Şekil 5.9). Numune sıcaklıkları, deney sıcaklığına ulaştıktan sonra, 50,8 mm/dak yerdeğiştirme oranında çalışan Marshall test aletinde, 1,42 cm genişliğindeki şerit çubuklar vasıtasıyla çizgisel yüke maruz bırakılmıştır (Şekil 5.10). Deney sonucunda elde edilen maksimum yük kullanılarak, indirek çekme gerilmeleri aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$S_t = \frac{2 P}{\pi t D} \quad (5.24)$$

Burada:

S_t : İndirekt çekme gerilmesi (kg/cm²),

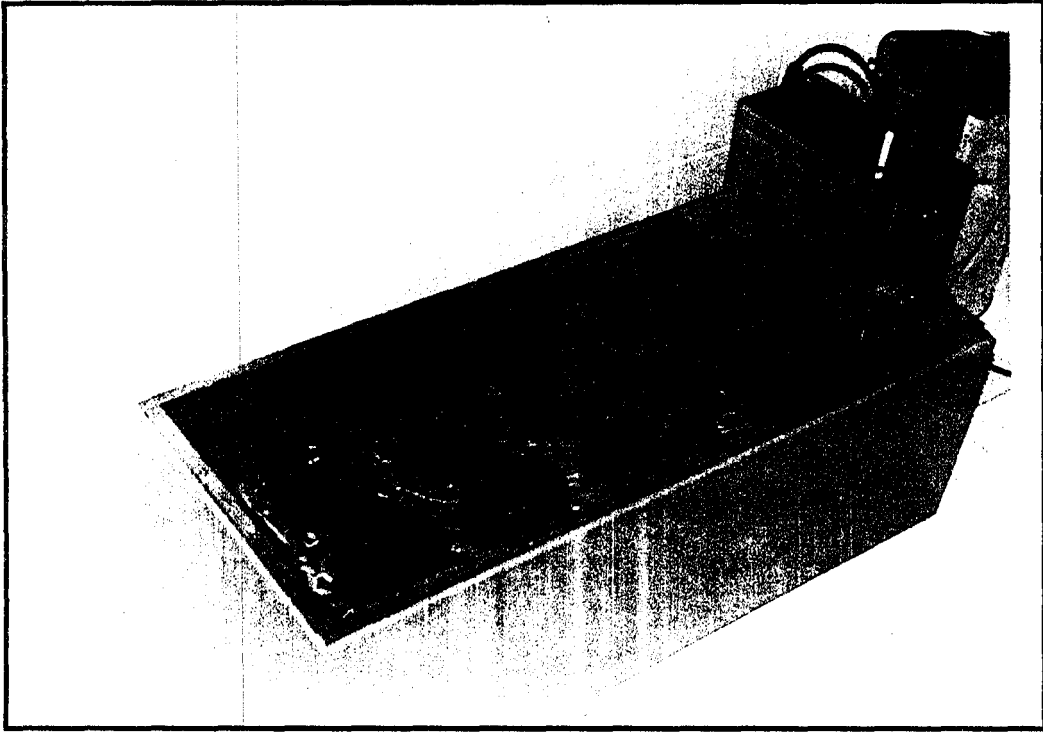
P : Maksimum yük (kg),

t : Numune kalınlığı (cm),

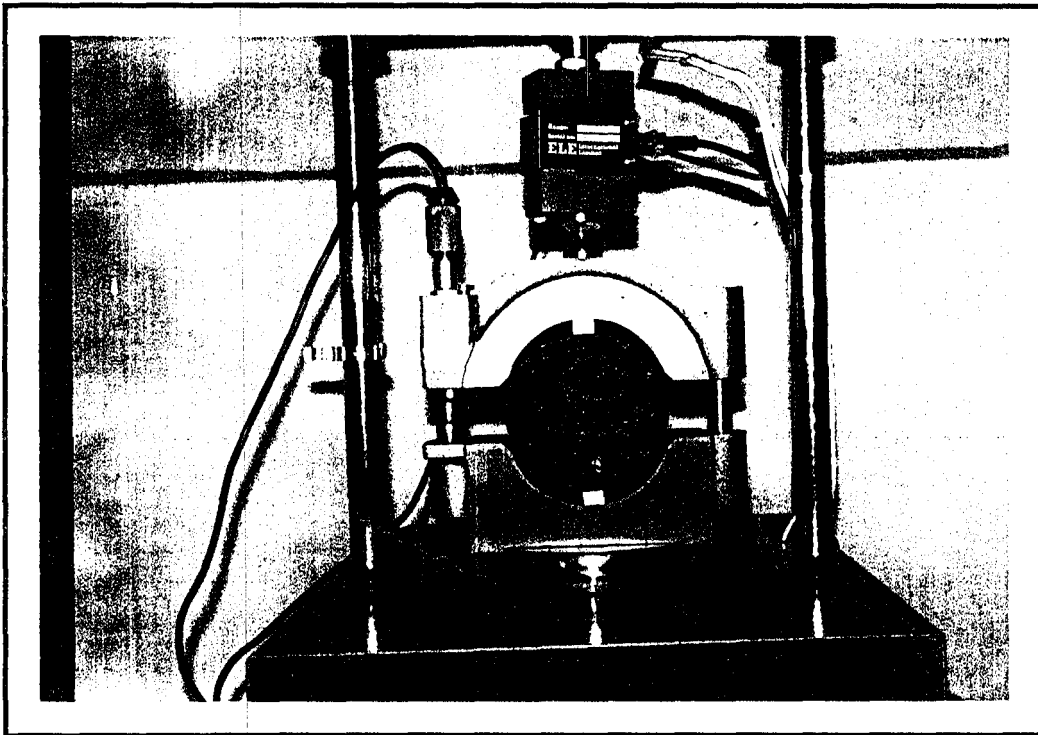
D : Numune çapı (cm).

5.6. Serbest Basınç Deneyi

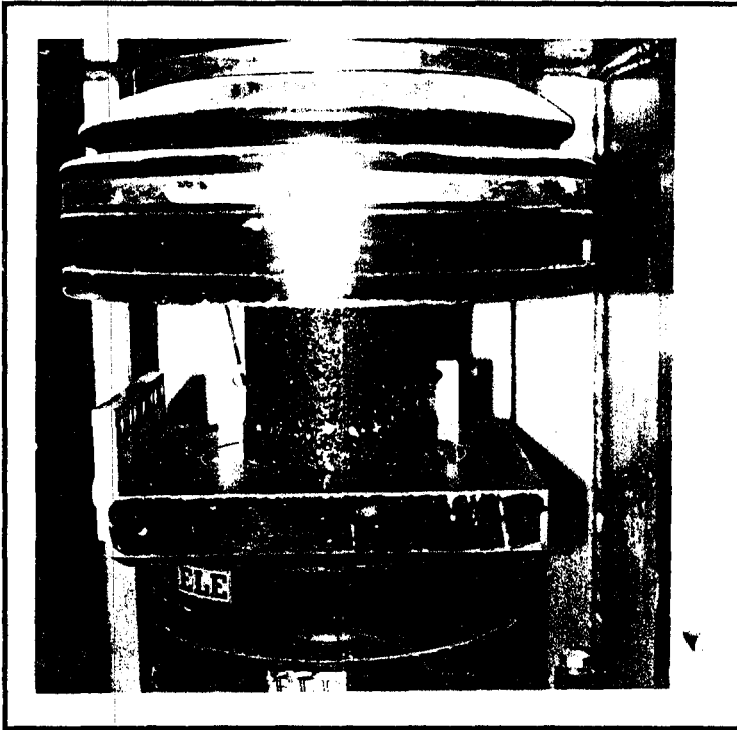
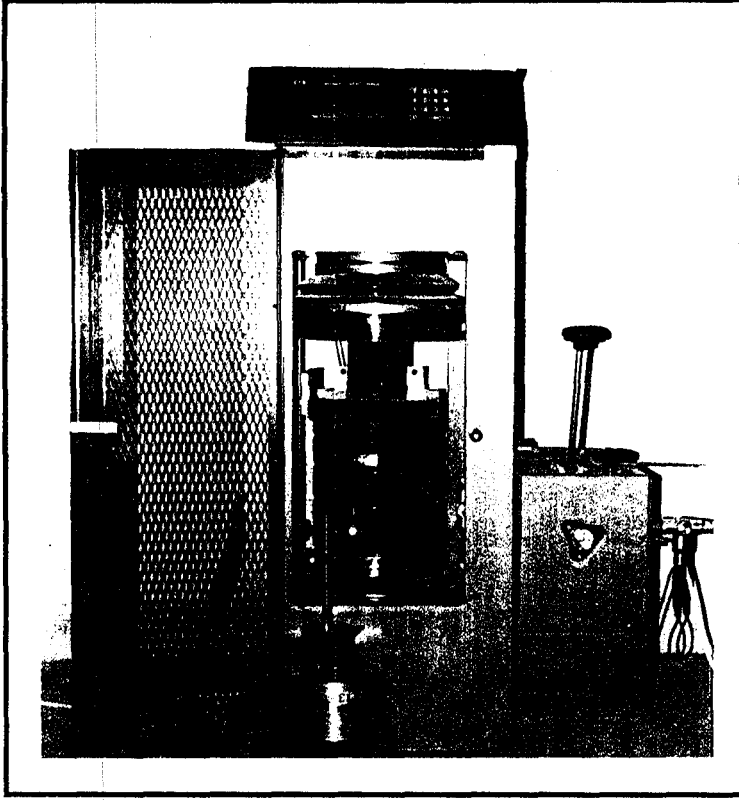
ASTM D 1074 deney metodu tatbik edilmiştir [34]. Marshall kompaktöründe hazırlanan numuneler, iki tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Herbir tabaka için, herbir yüzeye 75'er darbe uygulanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 24 saat 60 °C'lik etüvde kür edilerek 7 gün açık havada bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. ASTM D 2726'ya göre herbir briketin hacim özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. 4 saat 25±1 °C'lik su banyosunda deney sıcaklığına gelmesi sağlanan numuneler Şekil 5.11'de görülen fotoğraftaki deney düzeneğinde test edilmiştir. Deney aleti, deformasyon kontrollü olup, deformasyon hızı numune yüksekliğinin 0,05 katı olacak şekilde 5 mm/dak olarak belirlenmiştir.



Şkil 5.9. Su Banyosunda Bekletilen Marshall Biriketleri



Şkil 5.10. İndirek Çekme Deney Düzenoği



Şkil 5.11. Serbest Basınc Dayanımının Belirlendiği Dency Aleti

5.7. Su Hasarı Deneyi

Su hasarı deneyi için hazırlanan Marshall numuneleri özgül ağırlıkları birbirine yakın, en az 3 adet biriket içeren 4 gruba ayrılmıştır. Bunlardan 2 grubun ASTM D 1559'a göre Marshall stabilitesi ve AASHTO T-283'e göre indirek çekme dayanımları, diğer 2 grubun ise koşullu Marshall stabilitesi ve koşullu indirek çekme dayanımları belirlenmiştir.

AASHTO T-283 deney metodu ile laboratuvarında sıkıştırılmış bitümlü karışımların hızlandırılmış su etkileri nedeniyle çap düzleminde oluşan çekme dayanımının değişimi belirlenir. Asfalt çimentosuna ilave edilen katkı malzemelerin uzun süreli soyulma hassasiyetini tahmin etmekte de kullanılmaktadır. Bu metotta, her karışım grubu 2'ye ayrılmış ve bunlardan yarısı (koşulsuz numuneler) indirek çekme deneyi için kuru şartta denenmiştir. Diğer kısmı ise (koşullu numuneler) yaklaşık 5 dakika vakum tatbik edilerek doymuş hale getirilmiştir (Şekil 5.12). Vakumda doyurulmuş numuneler plastik bir film tabakası ile iyice sarılarak, her biri içerisinde 10 ml su bulunduran plastik torbalara konulmuştur. Daha sonra, numuneler 16 saat -18°C 'de derin dondurucuda (Şekil 5.13) ve 24 saat 60°C 'deki su banyosunda bekletilmiştir. Daha sonra 2 saat 25°C 'deki su banyosunda bekletilen numuneler indirek çekme deneyine tabi tutulmuştur.

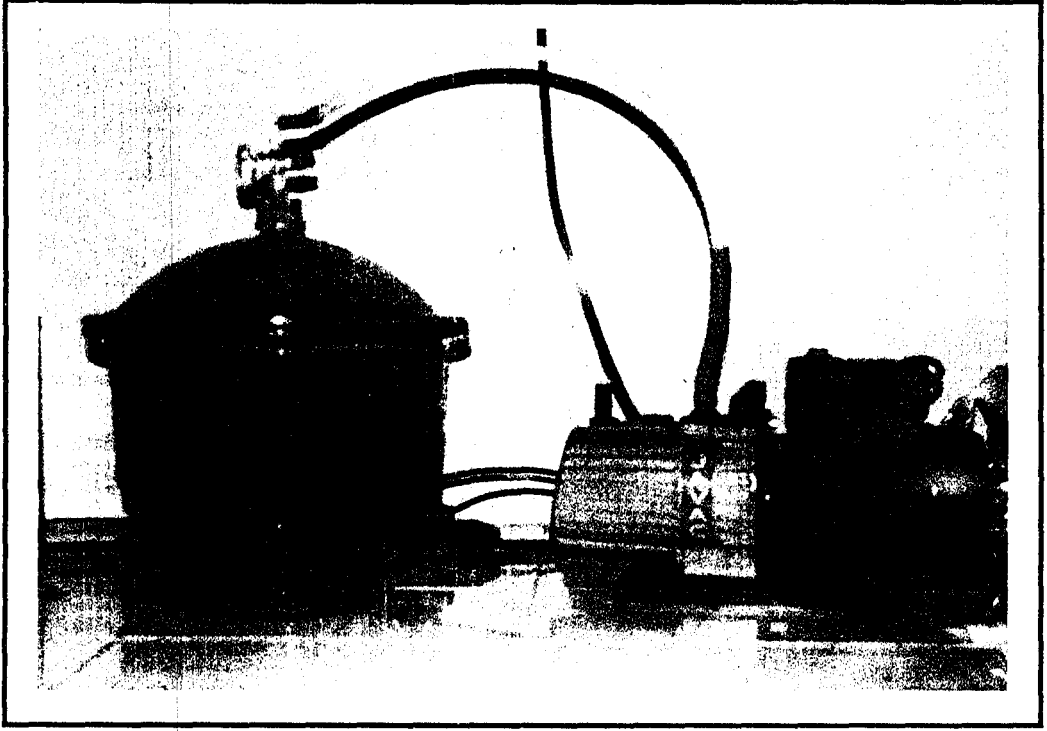
Asfalt karışımların suyun etkisine karşı direncinin sayısal indeksi, donma/çözülme koşullandırmasından sonraki dayanımın orijinal dayanıma oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Çekme dayanımı yüzdesi (\%)} = \frac{S_2}{S_1} \quad (5.25)$$

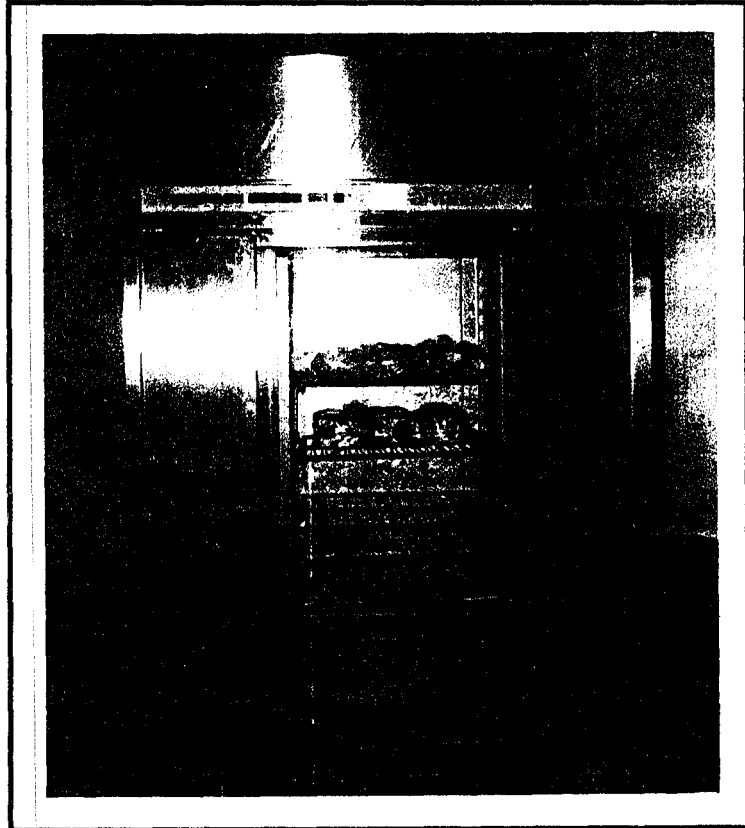
Burada:

S_1 : Koşulsuz grubun ortalama çekme dayanımı (kg/cm^2)

S_2 : Koşullu grubun ortalama çekme dayanımı (kg/cm^2)



Şkil 5.12. Desikatördeki Numunelere Vakum Uygulaması



Şkil 5.13. Su Hasarı Deneyinde Kullanılan Derin Dondurucu

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Kullanılan Agregaya için Yapılan Marshall Dizayn Sonuçları

6.1.1. Agregaya ve bitüme ait deney sonuçları

Bu bölümde, karışım dizaynı için gerekli değerler Çizelge 6.1'de toplu halde verilmiştir. Bu değerlerin elde edildiği deneyler çizelge olarak Ek-1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Agregaya ve Bitüme ait Deney Sonuçları

Bitüm özgül ağırlığı, (G_b)	1,024
Bitüm Penetrasyonu	83
Kaba agregaya hacim özgül ağırlığı	2,682
Kaba agregaya zahiri özgül ağırlığı	2,706
İnce agregaya hacim özgül ağırlığı	2,735
İnce agregaya zahiri özgül ağırlığı	2,652
Filler (taştozu) agregaya hacim özgül ağırlığı	2,786
Kaba agregaya yüzdesi, (%K)	44
İnce agregaya yüzdesi, (%I)	51
Filler yüzdesi, (%F)	5
Bitümlü kaplama karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı, (D_T)	2,502

(5.17) nolu eşitlikten,

$$\text{Agrega karışımının efektif özgül ağırlığı, } G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + 4,5}{2,502} - \frac{4,5}{1,024}}, \quad G_{ef} = 2,708$$

(5.12) nolu eşitlikten,

$$\text{Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı, } G_{sb} = \frac{100}{\frac{44}{2,682} + \frac{51}{2,652} - \frac{5}{2,763}}, \quad G_{sb} = 2,671$$

(5.13) nolu eşitlikten,

$$\text{Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı, } G_{sa} = \frac{100}{\frac{44}{2,706} + \frac{51}{2,736} - \frac{5}{2,763}}, \quad G_{sa} = 2,724$$

(5.18) nolu eşitlikten,

$$\text{Agreganın Bitüm Absorbsiyonu (\%), } P_{ba} = 100 \times \frac{2,708 - 2,671}{2,671 \times 2,708}, \quad G_{sa} = \% 0,51$$

olarak hesaplanmıştır.

6.1.2. Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları

ASTM D 2726'a göre gerekli tartımları yapılan numunelerin (5.15) nolu eşitlik kullanılarak hacim özgül ağırlıkları (D_p) bulunup, ASTM D 1559'a göre Marshall stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir.

Bu numunelerin, herbir asfalt yüzdesi için hacim özgül ağırlıkların (D_p) ortalamaları alınmıştır. Ortalamaya alınan aynı bitüm yüzdesinde briketlerin en büyük ve en küçük D_p değerleri arasındaki fark 0.020'den fazla olmamalıdır.

Herbir bitüm yüzdesi için,

(5.21) nolu eşitlik kullanılarak agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA),

(5.22) nolu eşitlik kullanılarak hava boşluğu yüzdesi (V_h),

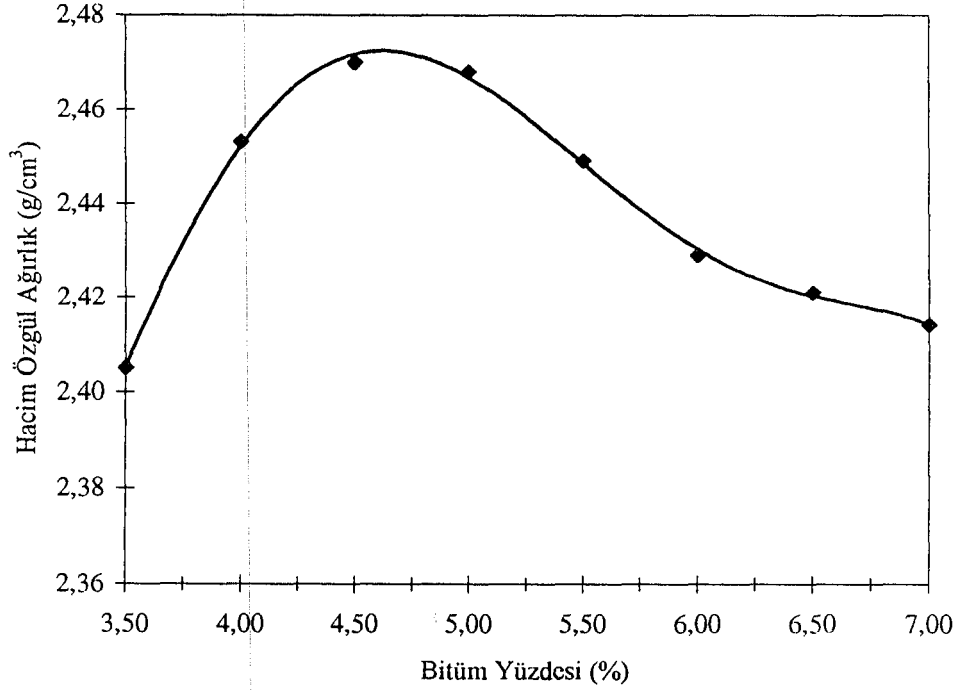
(5.23) nolu eşitlik kullanılarak asfaltla dolu boşluk yüzdesi (V_f) değerleri hesaplanmış ve Ek-2'de verilmiştir.

Hesaplanan bu değerler kullanılarak, hacim özgül ağırlık (D_p), asfaltla dolu boşluk yüzdesi (V_f), boşluk yüzdesi (V_h), stabilite, akma ve agregalar arası boşluk yüzdesinin bitüm yüzdesi ile değişimleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Çizilen bu grafiklerden Yollar Fenni Şartnamesinde asfalt betonu-aşınma tabakası (ağır trafikli yollar, otoyollar) için Çizelge 6.2' de verilen limit değerler gözönüne alınarak optimum bitüm muhtevası %4,5 olarak belirlenmiştir. Herbir bitüm yüzdesindeki deney sonuçları Ek-2'de verilmiştir.

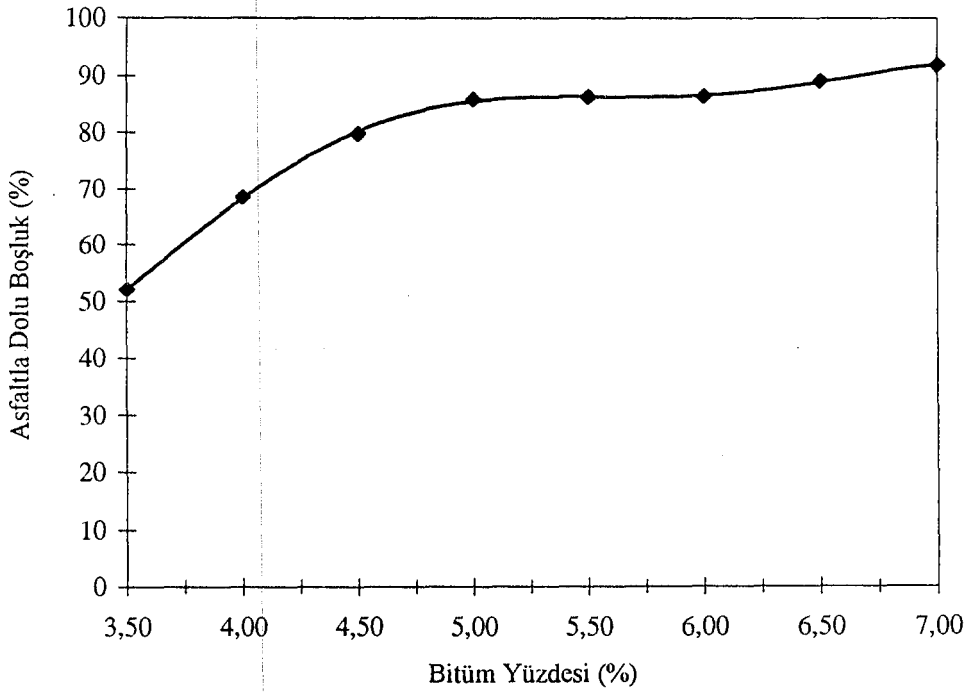
Çizelge 6.2. Optimum Bitümdeki Marshall Deney Sonuçları

Özellikler	Sonuçlar	Asfalt Betonu-Aşınma Tabakası için (Ağır Trafikli Yollar, Otoyollar, v.b.) Dizayn Kırirterleri *	
		Minimum	Maksimum
Optimum Bitüm Muhtevası (%)	4,5	4,0	7,0
Hacim Özgül Ağırlığı (g/cm^3)	2,470	-	-
Boşluk (%)	2,33	3	5
Asfaltla Dolu Boşluk (%)	79,76	75	85
Akma (mm)	2,44	2	4
Marshall Stabilitesi (kg)	1584	900	-

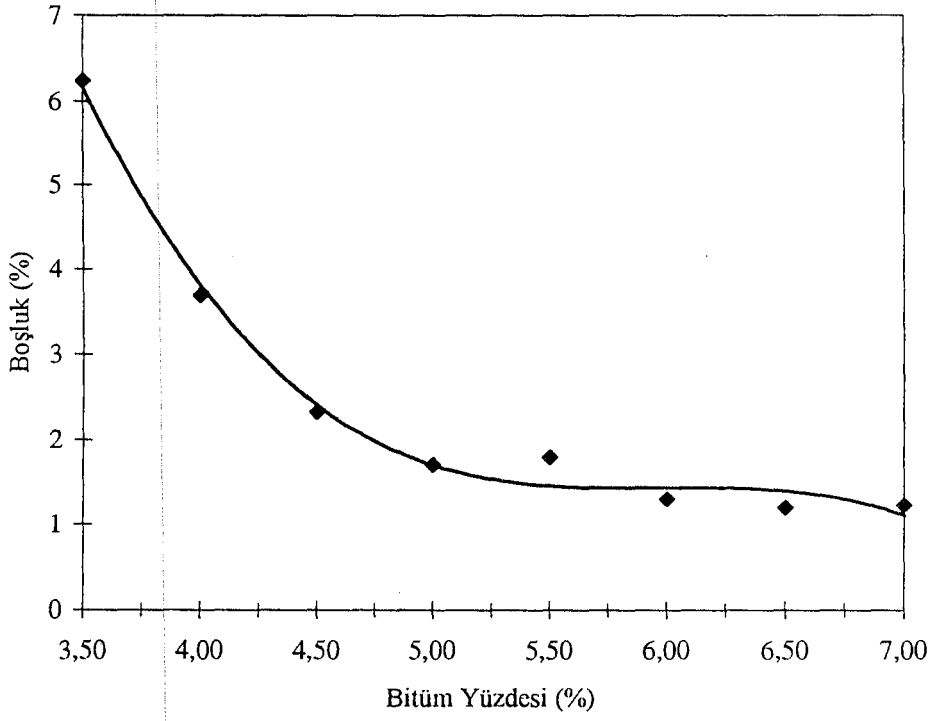
* Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnaması, 1994



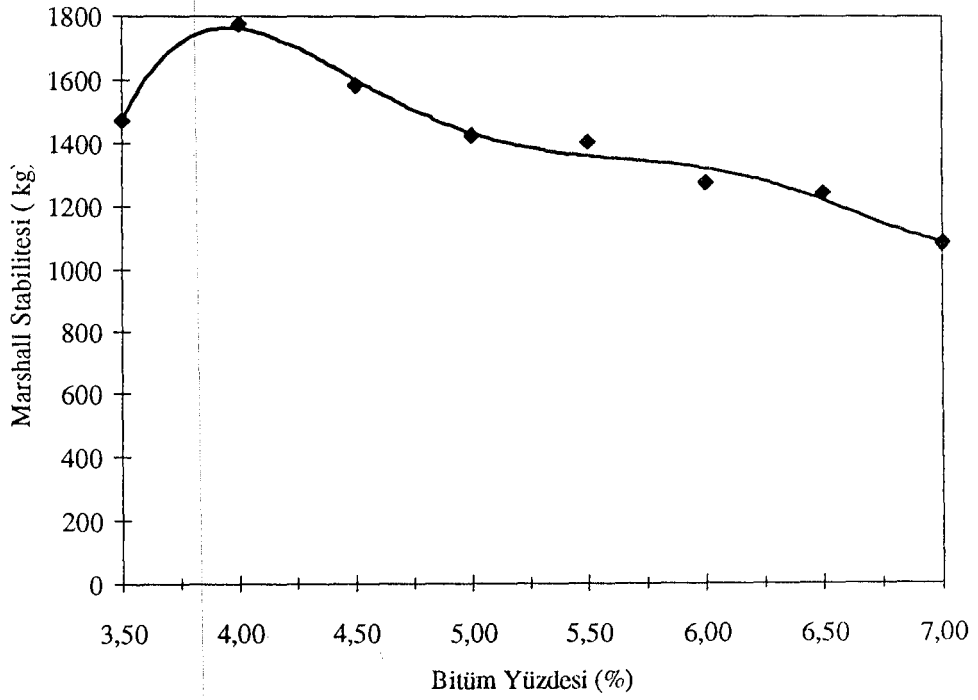
Şekil 6.1.a) Hacim Özgül Ağırlığın Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



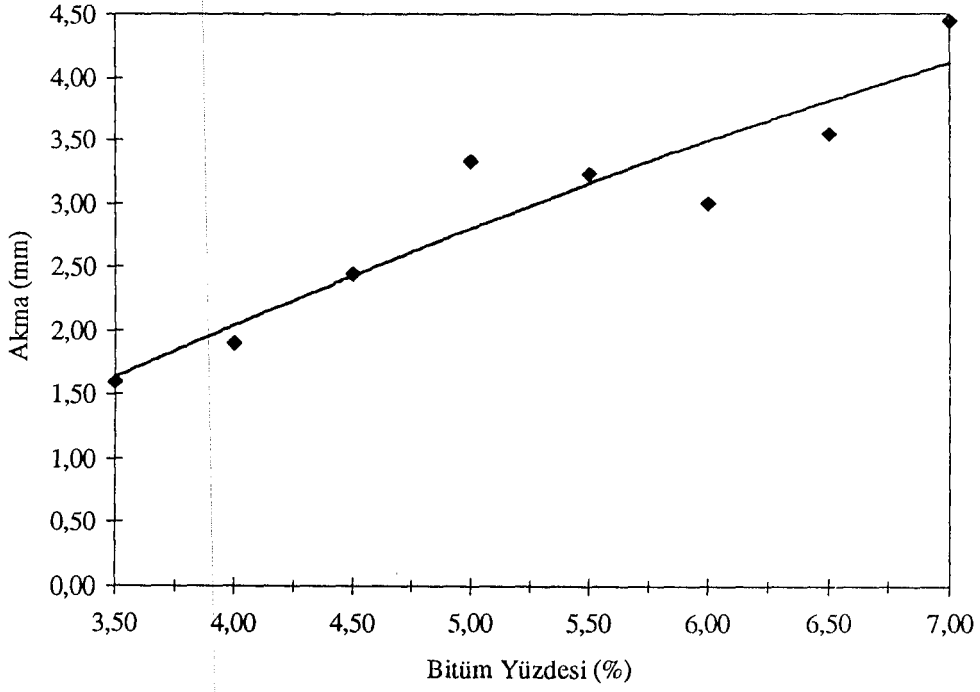
Şekil 6.1.b) Asfaltla Dolu Boşluğun Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



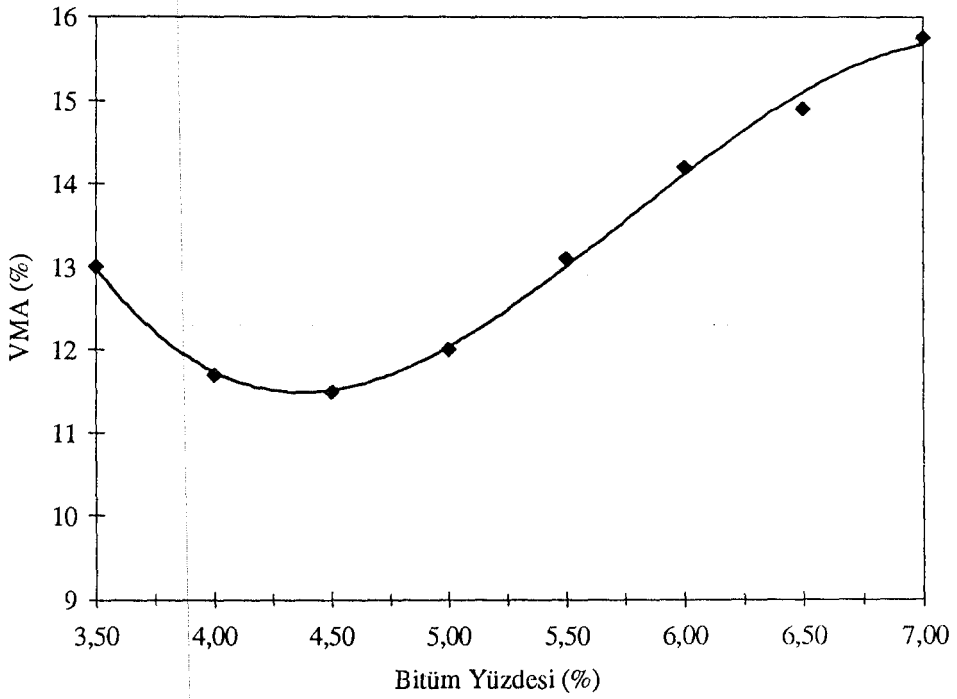
Şekil 6.1.c) Boşluğun Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 6.1.d) Marshall Stabilitesinin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 6.1.e) Akmanın Bitüm Yüzdeleri ile Değişimi



Şekil 6.1.f) Agregalar Arası Boşluğun (VMA) Bitüm Yüzdeleri ile Değişimi

6.2. Lastik ve Plastik Atıkların Etkisinin Araştırılması

6.2.1. Kullanılan lastik boyutunun belirlenmesi

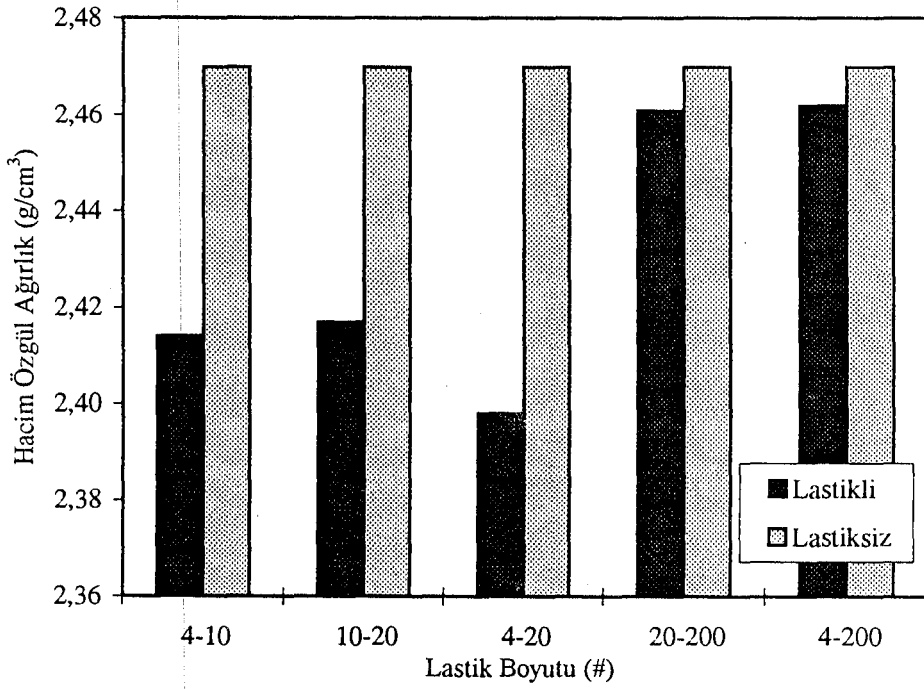
Bu bölümde, asfalt kaplama karışımların özelliklerine etkisinin en iyi şekilde gözlendiği lastik boyutları belirlenmiştir. Bunun için, edinilen bilgiler ışığında %4,5 optimum bitüm yüzdesinde bitüm miktarının %10'u olarak lastik ilave edilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.3'de verilmiştir. Bu lastikli numunelerden elde edilen sonuçlar, lastiksiz numunelerden elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Lastikli numunelerin hacim özgül ağırlık, boşluk yüzdesi, Marshall stabilitesi ve akma özelliklerin lastik boyutu ile değişimi sırasıyla Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de verilmiştir.

Yukadaki sonuçlara göre lastik boyutunun artması ile %4,5 bitüm ve %10 lastik ilavesinde, stabilite ve pratik özgül ağırlığın azaldığı, boşluk ve akmanın ise arttığı görülmektedir. Stabilitede en büyük azalma %31 ile 4-20 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunda, en küçük azalma ise %11 ile 20-200 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunda olmuştur. Akma da ise, en büyük artış %112 ile 4-20 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunda, en küçük artış ise %10 ile 20-200 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunda olmuştur.

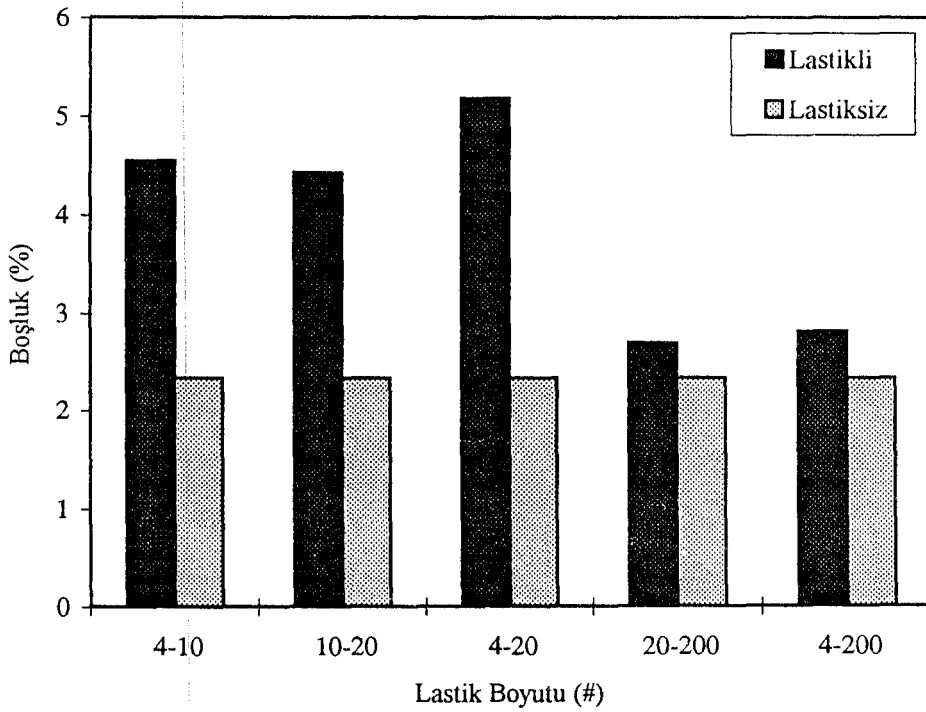
Bu bölümden edinilen sonuçlara göre lastik boyutunun davranışlarının en iyi şekilde izleneceği kanısına varılan, 4-20 nolu, 20-200 nolu ve 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik boyutları seçilmiş ve diğer çalışmalar bu lastik boyutları üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.3. Farklı Boyutlardaki Lastik Parçaların Marshall Stabilitesi

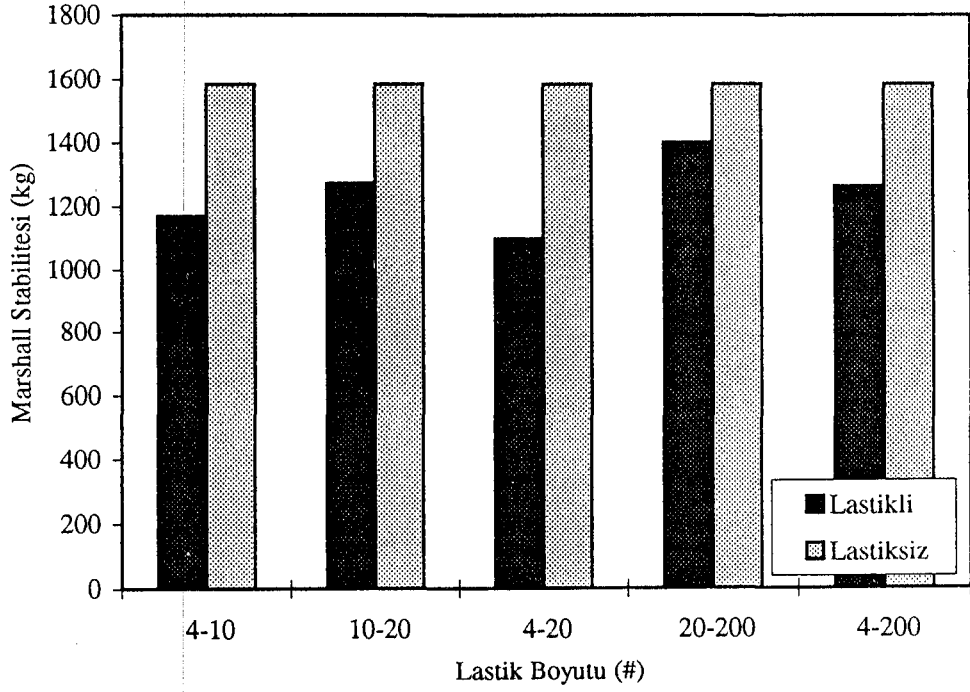
Lastik Boyutu (Elek No)	İlave Lastik Miktarı (bitümün %si olarak)	Boşluk (%) V_h	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3) D_p	Akma (mm)	Marshall Stabilitesi (kg)
4-10	10	4,55	2,414	4,55	1170
10-20	10	4,43	2,417	3,98	1272
4-20	10	5,18	2,398	4,53	1098
20-200	10	2,69	2,461	3,36	1401
4-200	10	2,81	2,462	3,93	1262



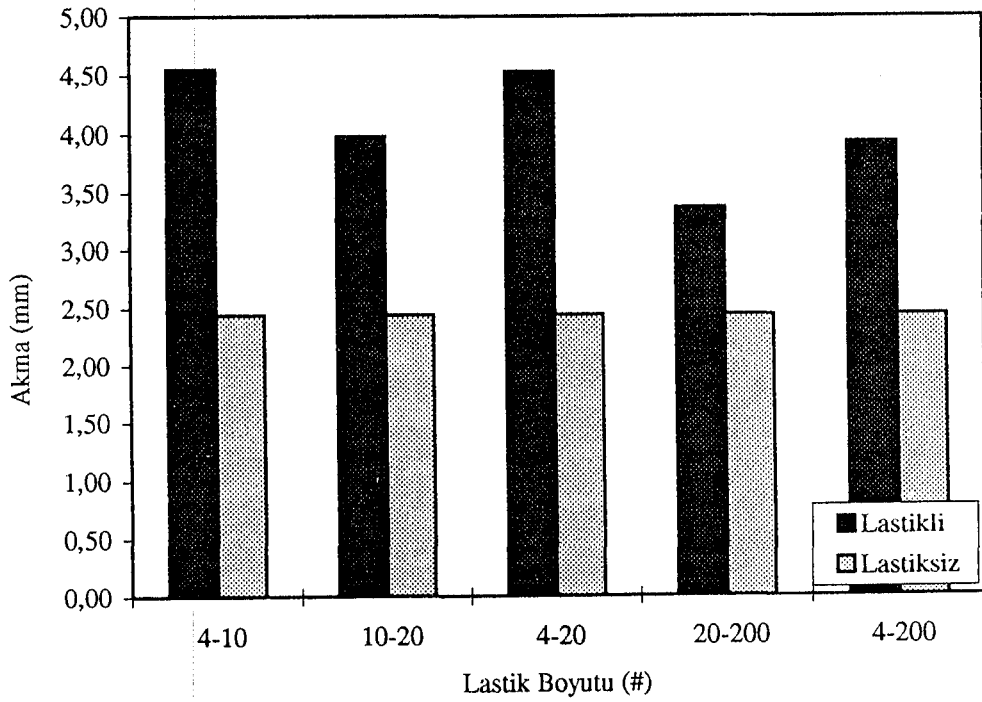
Şekil 6.2. Hacim Özgül Ağırlığın Lastik Boyutuyla Değişimi



Şekil 6.3. Boşluğun Lastik Boyutuyla Değişimi



Şekil 6.4. Marshall Stabilitenin Lastik Boyutuyla Değişimi



Şekil 6.5. Akmanın Lastik Boyutuyla Değişimi

6.2.2. Marshall stabilitesi ve akma deneyine etkisi

Bu çalışmada, 4-20, 20-200, 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları ve 4-10 nolu elekler arasında kalan plastik parçaları, bitüm miktarının % 5, % 10 ve % 20'si olarak karışıma ilave edilmiştir. Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'de verilmiştir. Ayrıca, lastik miktarının değişimi ile Marshall stabilite, akma, hacim özgül ağırlık ve boşluk özelliklerindeki değişimlerin izlenebilmesi için sonuçlar sırasıyla Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'de verilmiştir.

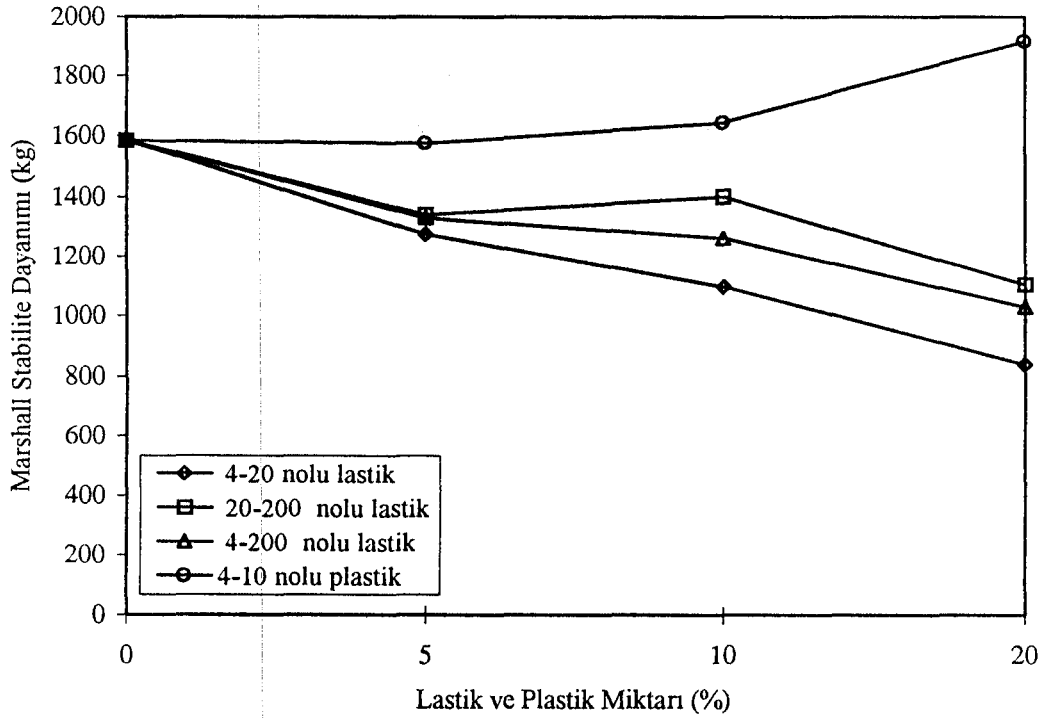
İlave edilen lastik miktarı arttıkça Marshall stabilitesi ve hacim özgül ağırlık azalmakta, akma ve boşluk ise artmaktadır. Yalnız, 20-200 boyutundaki lastikten %10 oranında ilave edilen numunelerin marshall stabilitelerinde %5'e göre az bir artış görülmüştür. 4-20 boyutundaki lastik parçaların %20 ilavesi haricindeki tüm stabilite değerleri alt limit değer olan 900 kg'ın üzerinde kalmıştır. Akma değerleri, 4-20 boyutundaki lastiğin %20 ilavesinde maksimum, 20-200 boyutundaki lastiğin %5 ilavesinde ise minimum değeri almıştır. Elde edilen akma değerlerinden lastikli karışımlar daha sünek bir davranış göstermektedir.

Plastik ilavesinde ise, lastiğin tam tersine ilave miktarı arttıkça Marshall stabilitesi ve boşluk artmakta, akma ve hacim özgül ağırlık ise azalmaktadır. %20 plastik ilavesinde, Marshall stabilitesinde %21'lik bir artış, akmada ise %17'lik bir azalma olmuştur.

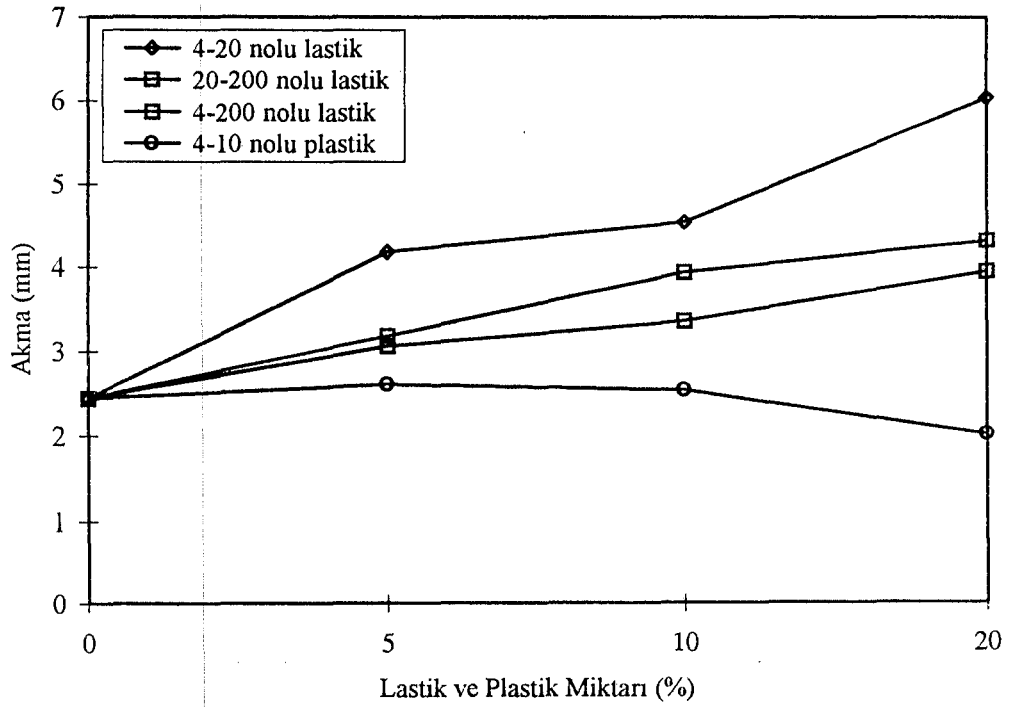
Bu sonuçlardan lastik ve plastik ilavesinin, kaplama karışımları üzerinde yaptığı etkilerin farklı olduğu görülmektedir. Lastik parçaları bitüm içerisinde erimemekte, polietilen esaslı plastik parçaları ise, bitüm içerisinde erimektedir. Plastik atıklar ile hazırlanan bağlayıcıların kıvamı ilave miktarı arttıkça oldukça artmaktadır.

Çizelge 6.4. Lastik ve Plastik İlaveli Numunelere ait Marshall Stabilite Değerleri

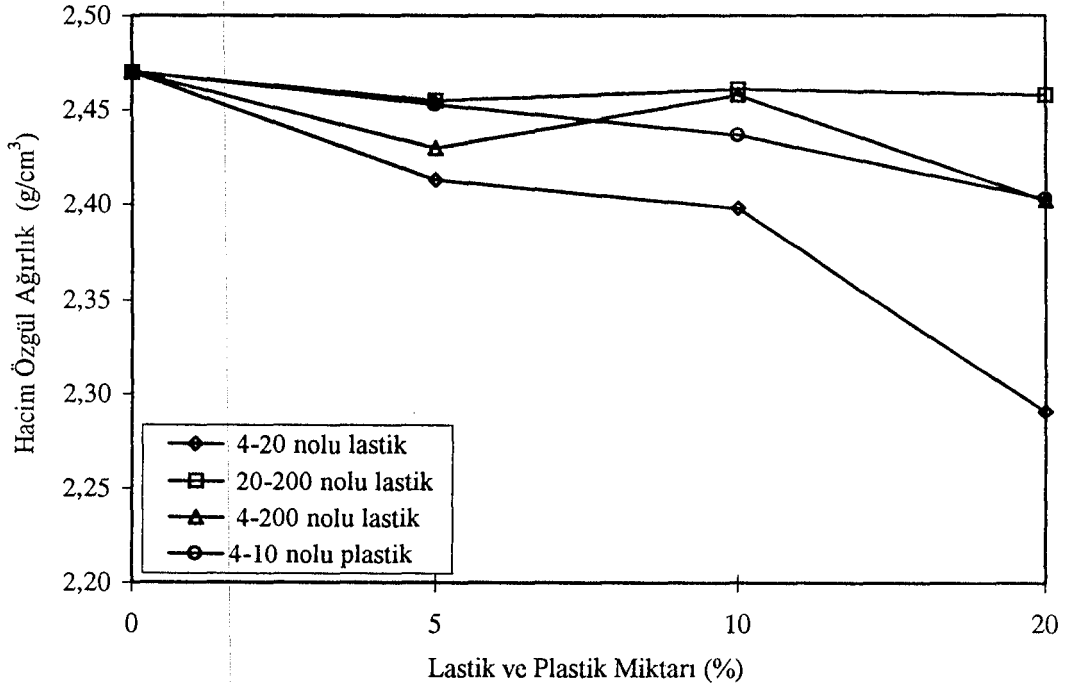
Lastik Boyutu (Elek No)	İlave Miktarı (bitümün %'si olarak)	Boşluk (%) V_h	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3) D_p	Akma (mm)	Marshall Stabilite (kg)
4-20	5	4,59	2,413	4,17	1276
	10	5,18	2,398	4,53	1098
	20	9,41	2,291	6,14	840
20-200	5	2,93	2,455	3,06	1341
	10	2,69	2,461	3,36	1401
	20	2,81	2,458	3,85	1104
4-200	5	3,92	2,430	3,18	1329
	10	2,81	2,458	3,93	1262
	20	5,38	2,402	4,24	1030
4-10 Plastik	5	3,01	2,453	2,61	1575
	10	3,64	2,437	2,54	1645
	20	4,98	2,403	2,02	1917



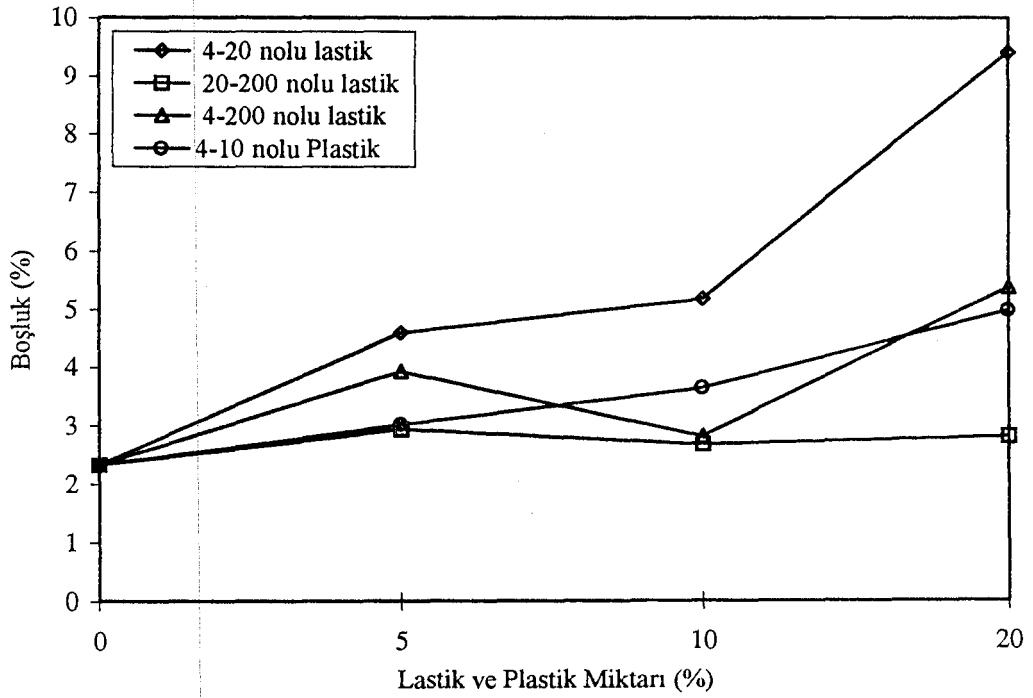
Şekil 6.6. Marshall Stabilitesinin Lastik ve Plastik Miktarı ile Değişimi



Şekil 6.7. Akmanın Lastik ve Plastik Miktarı ile Değişimi



Şekil 6.8. Hacim Özgül Ağırlığın Lastik ve Plastik Miktarı ile Değişimi



Şekil 6.9. Boşluğun Lastik ve Plastik Miktarı ile Değişimi

6.2.3. İndirek çekme deneyine etkisi

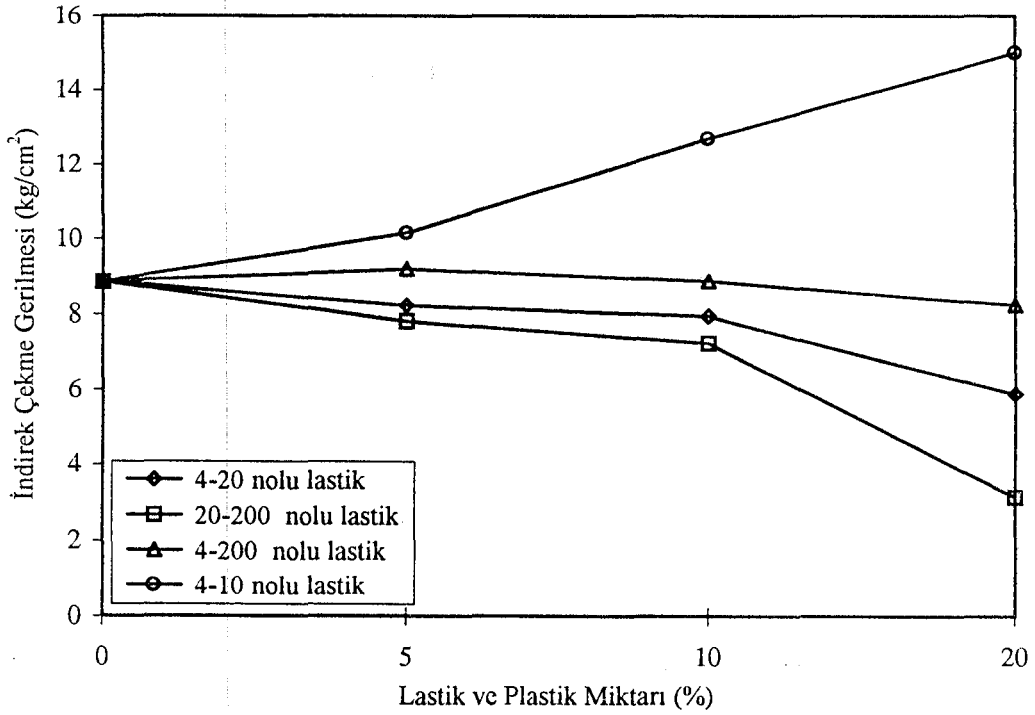
Bu çalışmada, 4-20, 20-200, 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları ve 4-10 nolu elekler arasında kalan plastik parçaları, bitüm miktarının %5, %10 ve %20'si olarak karışıma ilave edilmiştir. İndirek çekme deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi lastik miktarının artması ile indirek çekme gerilmesi azalmaktadır. Yalnız, 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunun %20 ilavesinde miktarında dahi %7'lik bir azalma olmuştur. En büyük azalma ise, %36 ile 20-200 nolu elekler arasında kalan lastik boyutunun ilavesinde görülmektedir. İlave edilen karışım içerisinde kaba daneli lastik bulunması çekme dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, 4-200 nolu elekler arasında kalan, iyi derecelenmiş lastik kullanılarak alınan sonuçlar, diğer lastik boyutları içinde en iyi sonucu vermiştir.

Plastik atıklarda ise, ilave miktarı arttıkça indirek çekme gerilmesi de artmıştır. %20'lik plastik ilavesinde katkısız numunelere göre %69'luk bir artış olmuştur. Plastik malzemeler ile bitüm arasında kimyasal bir reaksiyon olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.5. Lastik ve Plastik İlaveli Numunelere ait İndirek Çekme Gerilmesi Değerleri

Lastik Boyutu (Elek No)	Lastik Miktarı (bitümün %'si olarak)	Boşluk (%) V_b	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3) D_p	İndirekt Çekme Gerilmesi (kg/cm^2)
4-20	5	3.87	2.431	8.22
	10	4.23	2.422	7.95
	20	8.86	2.305	5.88
20-200	5	4.07	2.426	7.81
	10	2.49	2.466	7.23
	20	2.53	2.465	3.16
4-200	5	4.31	2.420	9.18
	10	3.56	2.439	8.86
	20	5.10	2.400	8.24
4-10 Plastik	5	2.73	2.434	10.15
	10	3.64	2.427	12.64
	20	4.98	2.386	14.99



Şekil 6.10. İndirek Çekme Gerilmesinin Lastik ve Plastik Miktarı ile Değişimi

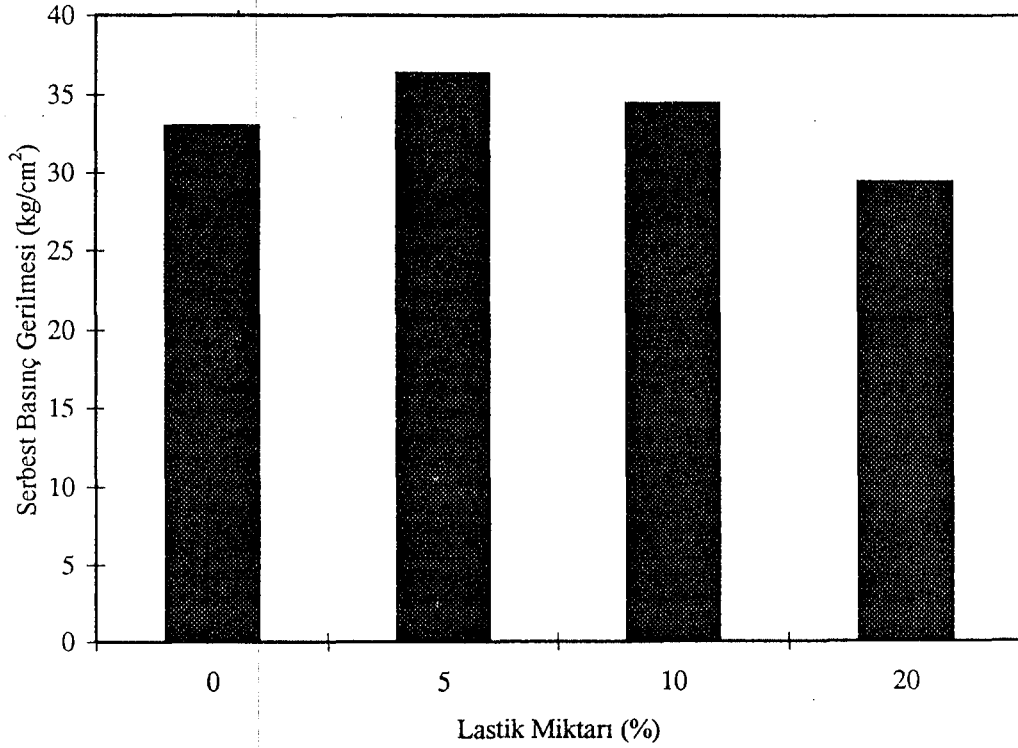
6.2.4. Serbest basınç dayanımına etkisi

Bu bölümde, 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları, bitüm miktarının %5'i, %10'u ve %20'si olarak karışıma ilave edilmiştir. Serbest basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'de verilmiştir. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, %5 ve %10 lastik ilaveli numunelerin lastiksiz numunelere göre basınç dayanımları sırasıyla %10 ve %5 oranında artmıştır. %20 lastik ilaveli numunelerde ise %11 oranında azalmıştır.

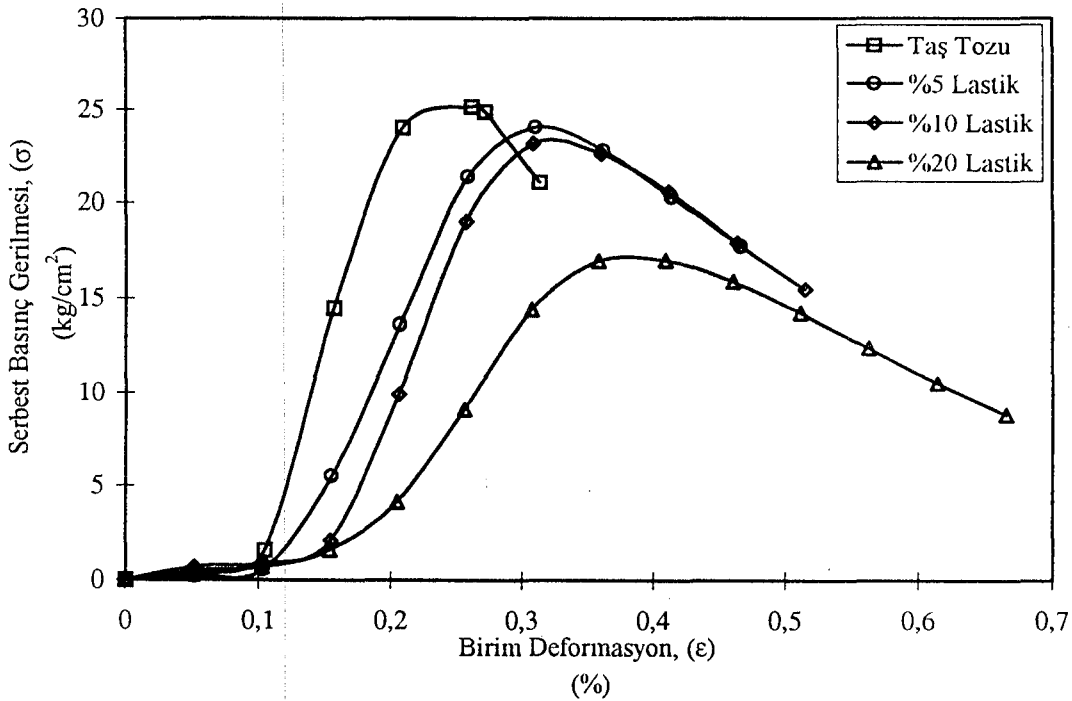
Şekil 6.12'de ise, numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Buradan, lastik miktarı arttıkça numunelerin elastisite modülünün azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, lastik miktarı arttıkça numunelerin esnekliği ve tokluğu artmaktadır. Bununla beraber, %5 ve %10 lastikli numunelerin basınç mukavemetleri lastiksiz numunelere oldukça yakındır. Bu sonuçlar, lastik ilavesinin kaplamaların çatlamalara karşı direncini arttıracağını göstermektedir. %20 lastik ilavesi numunelerin sünekliğini ve tokluğunu arttırmasına rağmen mukavemetini oldukça azaltmaktadır.

Çizelge 6.6. 4-200 Nolu Lastik İlaveli Numunelere ait Serbest Basınç Dayanımları

Briket No	İlave Miktarı (%)	Numune Yüksckliği (cm)	Hacim Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)
1	5	96,4	2,467	35,77
2	5	96,5	2,456	36,88
Ortalamalar			2,462	36,33
3	10	97,1	2,467	35,40
4	10	97,2	2,442	33,55
Ortalamalar			2,454	34,48
5	20	96,3	2,463	25,40 (iptal)
6	20	97,7	2,438	29,36
Ortalamalar			2,438	29,36



Şekil 6.11. Serbest Basınç Gerilmesinin Lastik Miktarı ile Değişimi



Şekil 6.12. Lastikli (4-20 Nolu) Numunelerin $\sigma - \epsilon$ Eğrileri

6.2.5. Su hasarı deneyine etkisi

Bu çalışmada, diğer lastik boyutlarına göre daha iyi çalıştığı görülen ve en geniş aralıktaki 4-200 nolu elekler arasındaki lastik parçalarının %5, %10 ve %20'si ve plastik parçaların %5 ilavesi ile hazırlanan numuneler koşullandırılmıştır. Koşullandırılan bu numuneler üzerinde Marshall stabilite ve indirek çekme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, aynı şekilde koşullandırılan katkısız numunelerle karşılaştırılmıştır. Koşullu ve koşulsuz numuneler için Marshall ve indirek çekme deneyin sonuçları sırasıyla Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8'da verilmiştir.

%10 ve %20 oranında lastik ilaveli numunelerin koşullu indirek çekme değerlerinde ki azalma biraz daha fazladır (Şekil 6.13). Koşullandırılmış katkısız numunelerde %12'lik bir azalma gözlenirken, %5 lastik ilaveli numunelerde %11, %10 ve %20'lik numunelerde ise %25'lik bir azalma görülmüştür (Şekil 6.14). Plastik ilaveli numunelerin su hasarına karşı daha dayanıklı oldukları belirlenmiştir. %5 plastik içeren, koşullu numunelerin koşulsuz numunelere göre çekme mukavemetinde %5'lik bir azalma görülmüştür (Şekil 6.14).

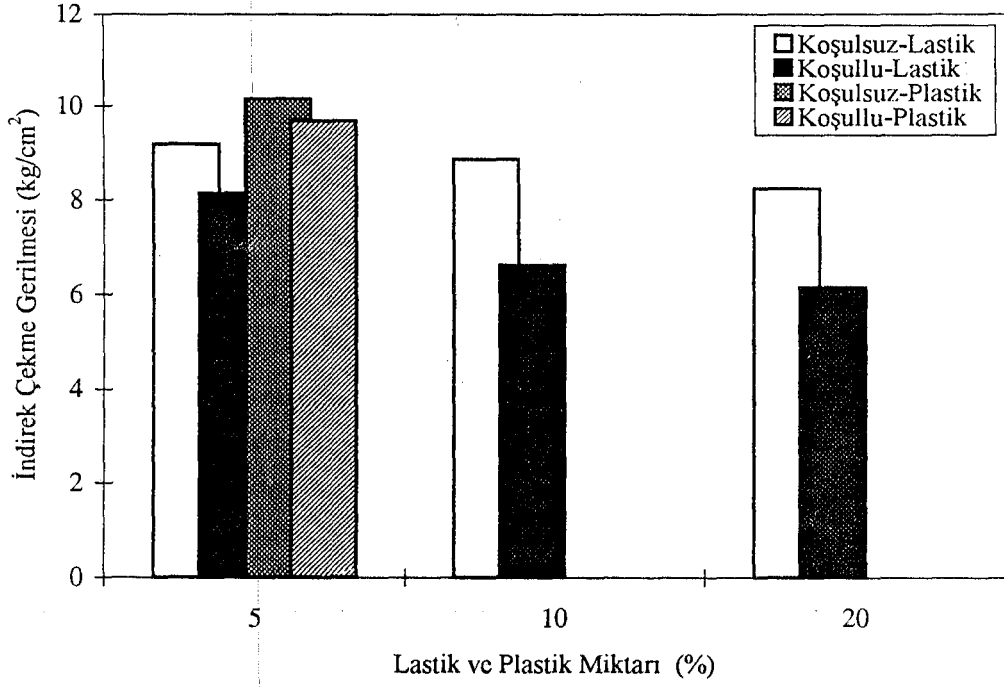
Lastikli numunelerin koşullu Marshall stabilite değerlerinde ise artışlar olduğu görülmektedir (Şekil 6.15). %5, %10 ve %20 ilaveli numunelerde Marshall stabilite sırasıyla %6, %3 ve %5 oranında artmıştır (Şekil 6.16). %5 plastik ilaveli numunelerin koşullu Marshall stabilitesi ise %2 oranında azalmıştır. Marshall deneyinin meydana gelen değişimleri tam ve doğru yansıtmadığı görülmektedir. İndirek çekme gerilmesi deneyinden daha sağlıklı sonuçlar alınmaktadır.

Çizelge 6.7. Lastik ve Plastik İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait Marshall Stabilite Değerleri

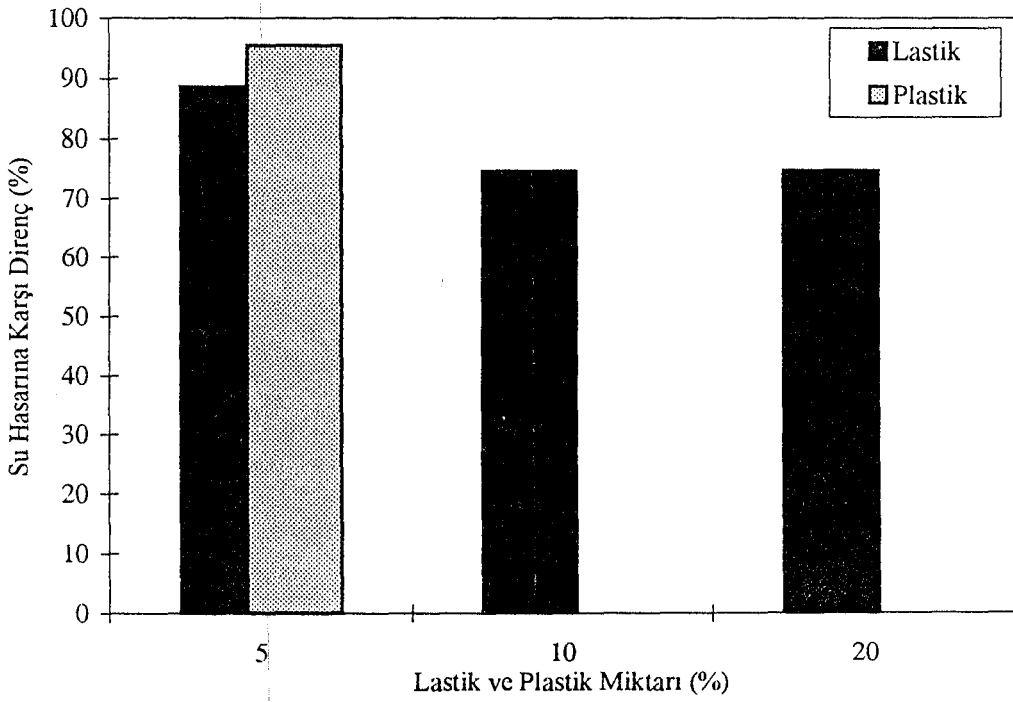
Lastik Boyutu (Elck No)	İlave Miktarı (bitümün %'si olarak)	Numune Tipi	Boşluk (%) V_h	Hacim Özgül Ağırlık D_p (g/cm^3)	Akma (mm)	Marshall Stabilitesi (kg)
4-200	5	Koşulsuz Marshall	3,92	2,430	3,18	1329
		Koşullu Marshall	2,81	2,458	3,93	1413
	10	Koşulsuz Marshall	2,81	2,458	3,93	1262
		Koşullu Marshall	2,89	2,456	4,60	1296
	20	Koşulsuz Marshall	5,38	2,402	4,24	1030
		Koşullu Marshall	4,67	2,411	4,27	1086
4-10 nolu Plastik	5	Koşulsuz Marshall	3,01	2,453	2,61	1575
		Koşullu Marshall	3,19	2,449	3,17	1542

Çizelge 6.8. Lastik ve Plastik İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait İndirek Çekme Değerleri

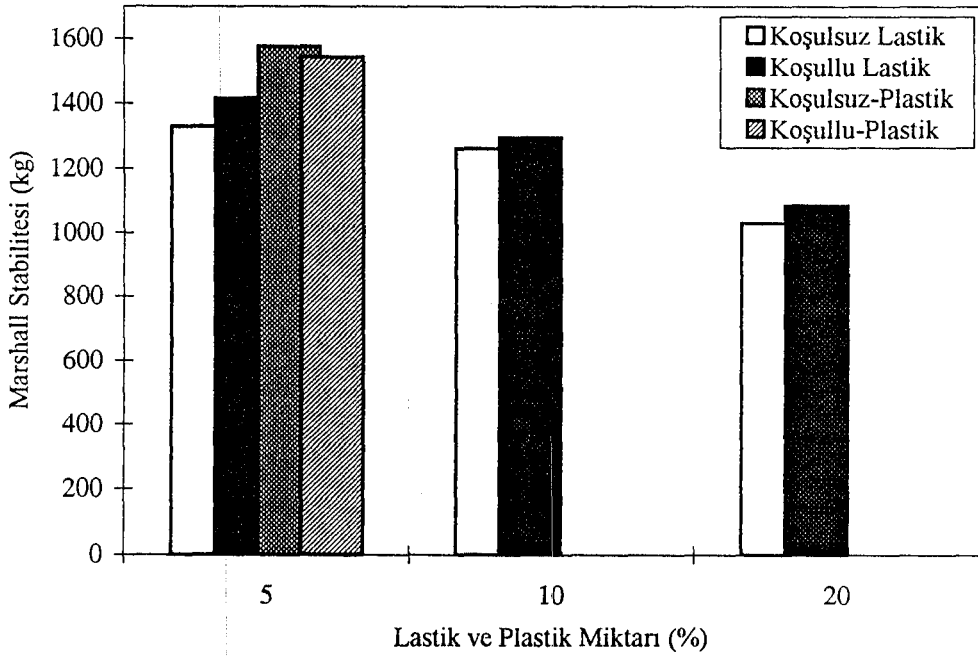
Lastik Boyutu (Elck No)	İlave Miktarı (bitümün %'si olarak)	Numunc Tipi	Boşluk (%) V_h	Hacim Özgül Ağırlık D_p (g/cm^3)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kg/cm^2)
4-200	5	Koşulsuz Marshall	4,31	2,420	9,18
		Koşullu Marshall	3,60	2,438	8,13
	10	Koşulsuz Marshall	3,56	2,439	8,86
		Koşullu Marshall	2,85	2,457	6,61
	20	Koşulsuz Marshall	5,10	2,400	8,24
		Koşullu Marshall	4,51	2,415	6,15
4-10 nolu Plastik	5	Koşulsuz Marshall	2,73	2,434	10,15
		Koşullu Marshall	3,19	2,434	9,68



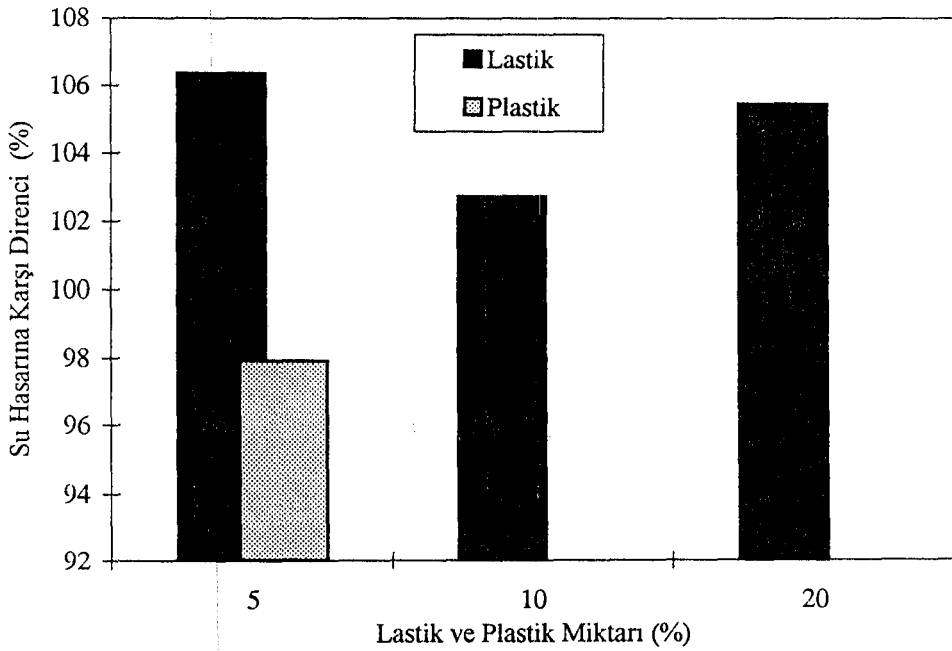
Şkil 6.13. Lastik ve Plastik İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait İndirek Çekme Dayanımları



Şkil 6.14. Lastik ve Plastik İçeren Numunelere ait Koşullu/Koşulsuz İndirek Çekme Dayanımları



Şekil 6.15. Lastik ve Plastik İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait Marshall Stabilite Değerleri



Şekil 6.16. Lastik ve Plastik İçeren Numunelere ait Koşullu/Koşulsuz Marshall Stabilitesi Değerleri

6.3. Kül, Petrollü Sondaj Atığı, Mermer Tozu, Lastik Tozu, Çimento ve Kireç'in Filler Malzemesi Olarak kullanıldığı Çalışmanın Sonuçları

Bu atık ve malzemeler, kullanılan agrega gradasyonunun %5'ini filler olarak oluşturan ve 0,075 mm.'den daha küçük boyuttaki taş tozu ile yer değiştirilmişlerdir. Hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite, indirek çekme, serbest basınç ve su hasarı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

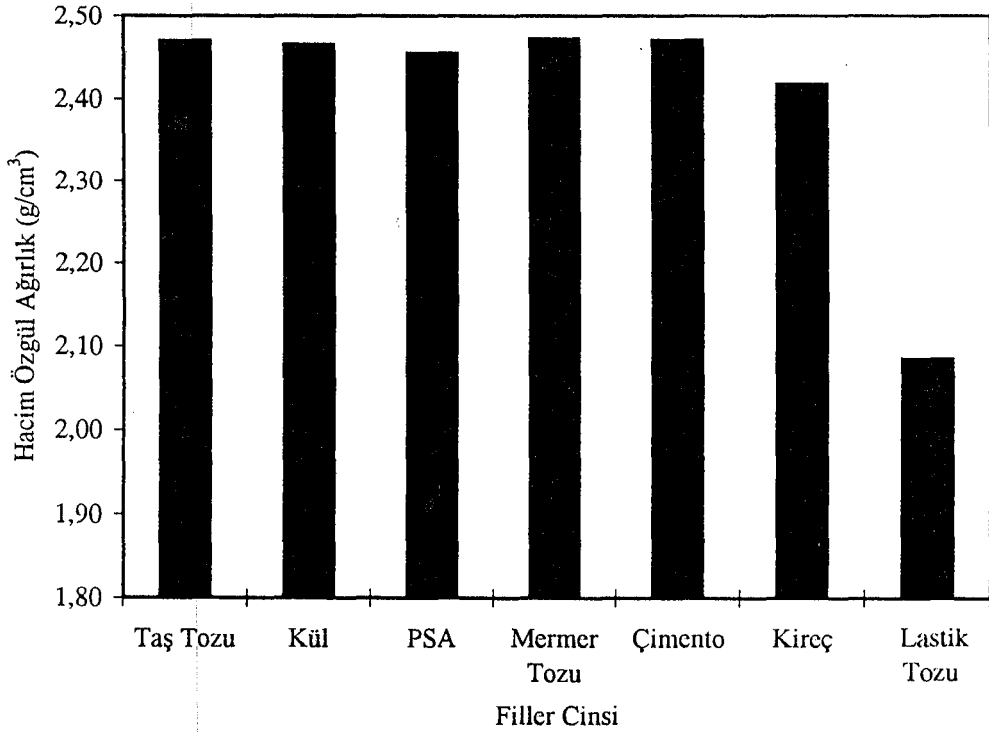
6.3.1. Marshall deneyi sonuçları

Bu bölümde elde edilen koşullu ve koşulsuz numunelere ait Marshall stabiliteyi Çizelge 6.9'da verilmiştir. Lastik tozu ve kireç haricinde, diğer filler malzemeleri kullanılarak hazırlanan karışımların hacim özgül ağırlıkları birbirine yakındır (Şekil 6.17). Akma değerleri, lastik tozu hariç tüm filler malzemeleri için limitler içinde kalmıştır (Şekil 6.18). Lastik tozu ilavesinde Marshall stabilitesinde %73'lük bir azalma olmuştur. Çimento, mermer tozu ve kireçli numunelerin Marshall stabiliteyi taş tozuna göre sırasıyla %17, %10 ve %6 oranında artmıştır. Petrollü sondaj atığı ve kül karıştırılan numunelerde ise %6'lık bir azalma görülmüştür (Şekil 6.19).

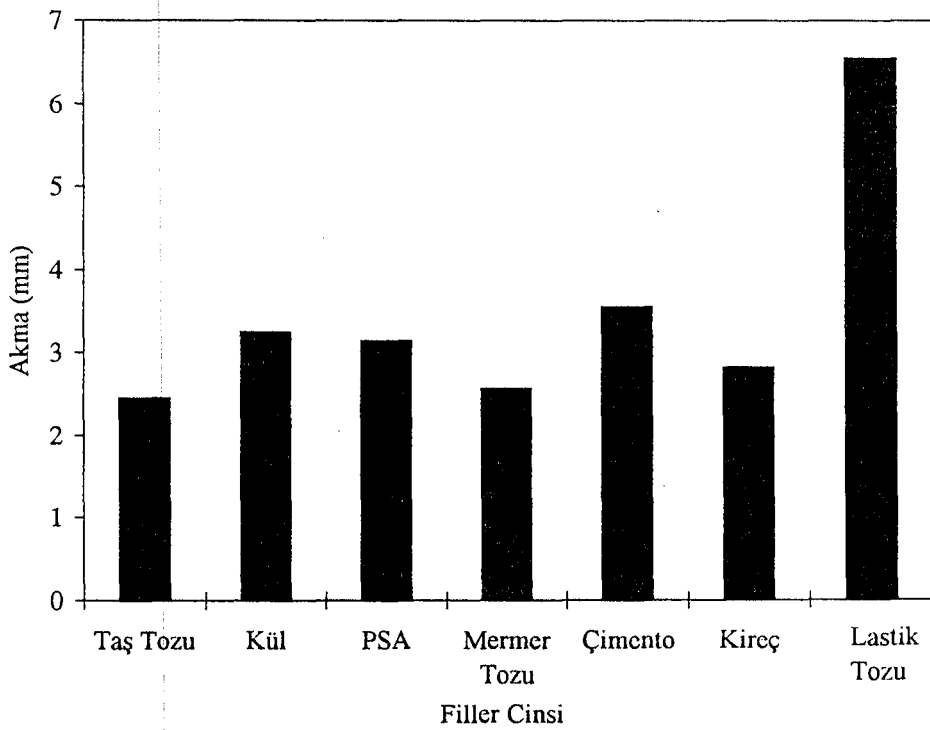
100-200 nolu elekler arasında kalan lastik tozları kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan Marshall deney sonuçları iyi bir sonuç elde edilememiştir. Bunun sebebi, agreganın %5'i kadar kullanılan lastik tozlarının miktarının fazla oluşuna bağlanabilir. Bundan dolayı çalışmanın diğer aşamalarından çıkarılmıştır.

Çizelge 6.9. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait Marshall Stabilite Değerleri

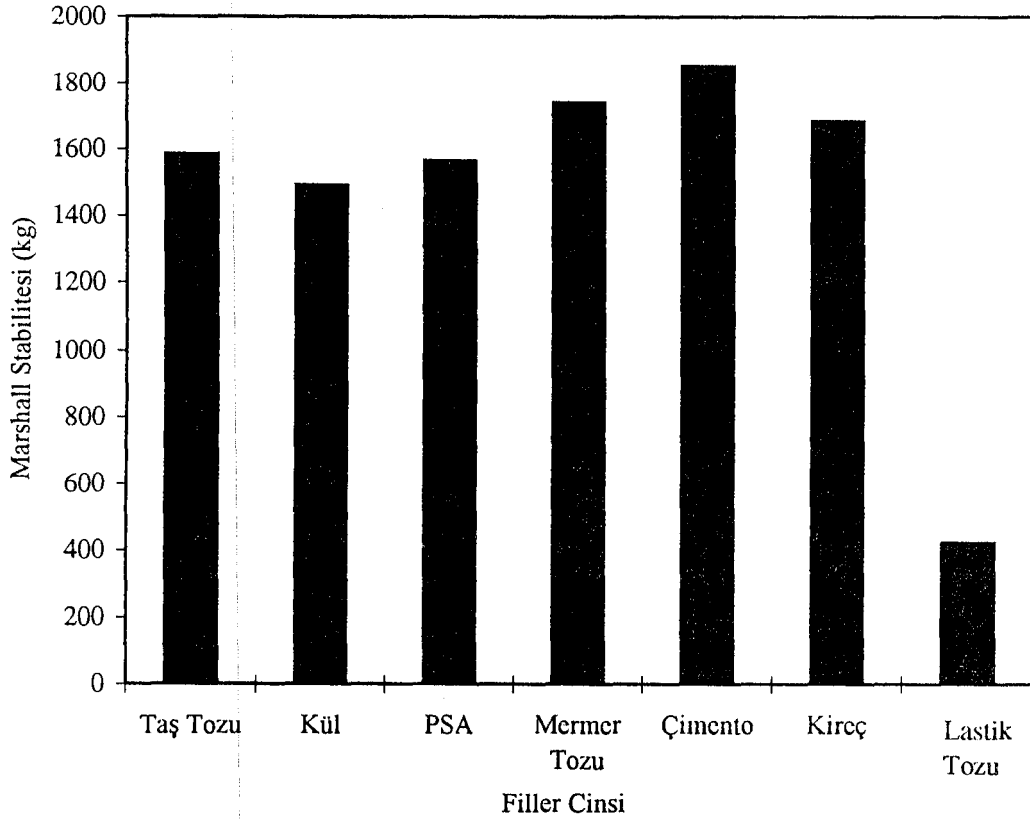
Filler Cinsi	Numune Tipi	Pratik Özgül Ağırlık (g/cm ³) D _p	Akma (mm)	Marshall Stabilite Değeri (kg)
Taş Tozu	Koşulsuz Numune	2,470	2,44	1584
	Koşullu Numune	2,466	3,38	1564
Kül (Fly ash)	Koşulsuz Numune	2,466	3,24	1492
	Koşullu Numune	2,467	3,25	1534
Petrollü Sondaj Atığı	Koşulsuz Numune	2,455	3,13	1493
	Koşullu Numune	2,458	3,67	1302
Mermer Tozu	Koşulsuz Numune	2,473	2,56	1740
	Koşullu Numune	2,464	3,68	1615
Çimento	Koşulsuz Numune	2,471	2,95	1852
	Koşullu Numune	2,470	4,23	1470
Kireç	Koşulsuz Numune	2,418	2,81	1685
	Koşullu Numune	2,434	3,23	1504
Lastik Tozu	Koşulsuz Numune	2,086	6,54	426
	Koşullu Numune	-	-	-



Şekil 6.17. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Hacim Özgül Ağırlık Değerleri



Şekil 6.18. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Akma Değerleri



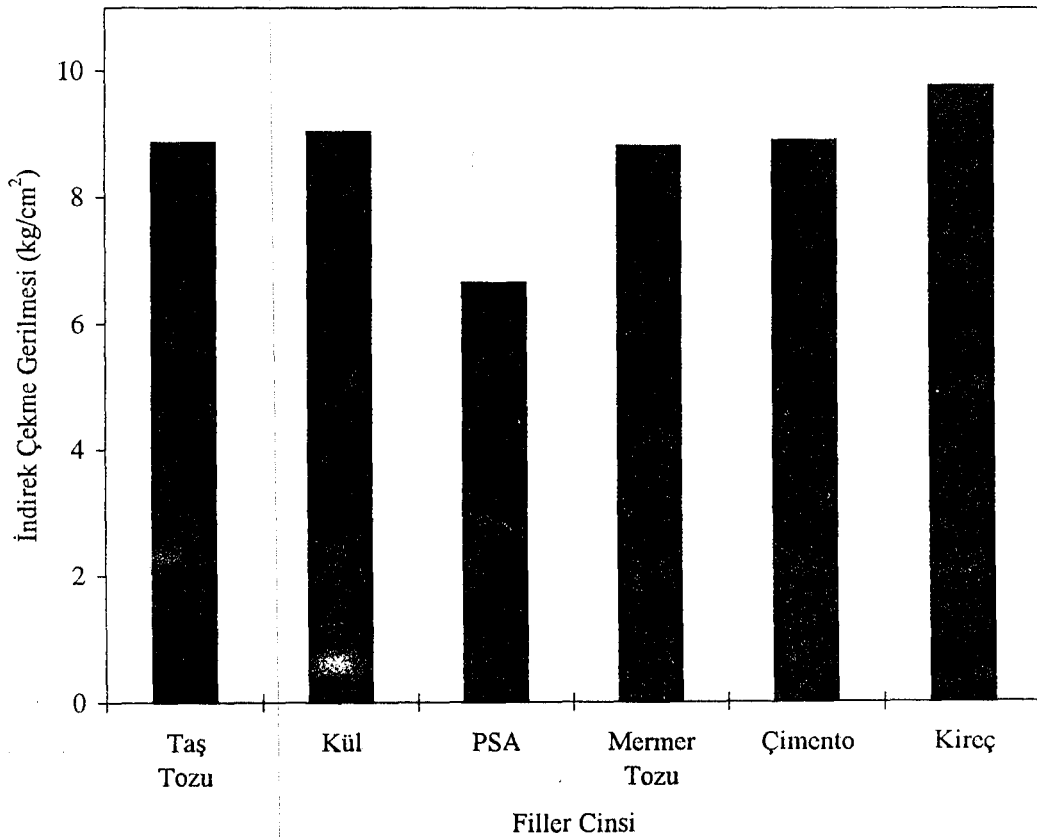
Şekil 6.19 Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Marshall Stabilitite Değerleri

6.3.2. İndirek çekme deneyi sonuçları

Bu bölümde hazırlanan koşullu ve koşulsuz numunelere ait indirek çekme gerilmeleri Çizelge 6.10'da verilmiş olup sonuçlar ayrıca Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Kireç, kül ve çimento içeren numunelerin taş tozu içeren numunelere göre sırasıyla, %10, %1,92 ve %0,45'lik artış, mermer tozunda ise %0,68'lik bir azalma olmuştur. Petrollü sondaj çamuru içeren numunelerde ise %25'lik bir azalma görülmüştür. Bu sonuçlardan, petrollü sondaj atığın karışımlar üzerindeki olumsuz etkisi açıkça görülmektedir. Bunun sebebi ise, petrollü sondaj atığın oldukça fazla bentonit kili ve organik madde içermesidir.

Çizelge 6.10. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait İndirek Çekme Değerleri

Filler Cinsi	Numune Tipi	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3) D_p	İndirek Çekme Dayanımı (kg/cm^2)
Taş Tozu	Koşulsuz Numune	2,471	8,85
	Koşullu Numune	2,453	7,79
Fly Ash	Koşulsuz Numune	2,456	9,02
	Koşullu Numune	2,446	6,75
Petrollü Sondaj Atığı (PSA)	Koşulsuz Numune	2,448	6,63
	Koşullu Numune	2,437	4,71
Mermer Tozu	Koşulsuz Numune	2,469	8,79
	Koşullu Numune	2,452	6,37
Çimento	Koşulsuz Numune	2,473	8,89
	Koşullu Numune	2,479	6,66
Kireç	Koşulsuz Numune	2,440	9,76
	Koşullu Numune	2,442	8,80



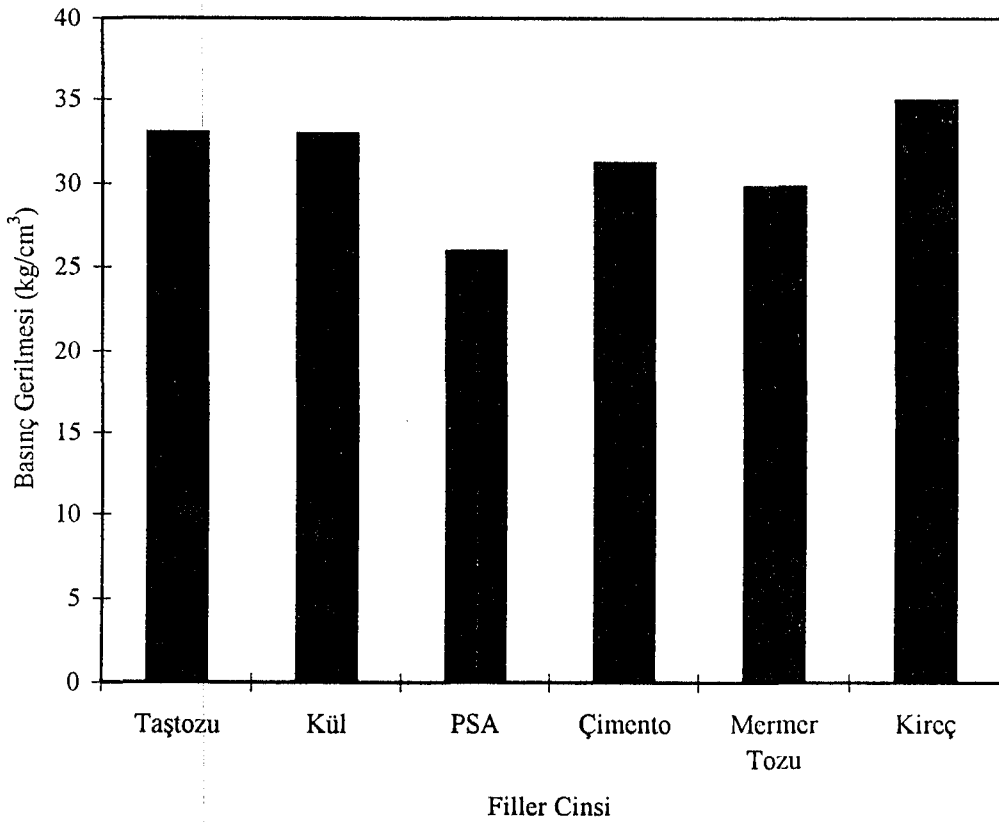
Şekil 6.20. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait İndirek Çekme Değerleri

6.2.4. Serbest basınç deneyi sonuçları

Farklı filler malzemeleri agrega miktarının %5'i oranındaki taş tozu ile yer değiştirilerek serbest basınç değerleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.21'de görüldüğü gibi, en büyük basınç gerilmesi kireçli karışımlardan ve en küçük basınç gerilmesi ise petrollü sondaj atıklarıyla hazırlanan numunelerden elde edilmiştir. Kül ve taş tozundan alınan değerler ise birbirine çok yakındır. Petrollü sondaj atıkların mukavemeti azaltıcı etkisi serbest basınç deneyinden de açıkça görülmektedir. Kül ilavesi mukavemeti olumsuz yönde etkilememektedir. Dolayısıyla, asfalt kaplama karışımlarında filler malzemesi olarak kullanılabilir.

Çizelge 6.11. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Serbest Basınç Gerilmeleri

Filler Cinsi	Briket No	Numune Yüksekliği (cm)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Serbest Basınç Gerilmesi (kg/cm ²)
Taştozu	1	96,8	2,476	32,07
	2	95,6	2,352	34,17
Ortalamalar			2,464	33,00
Kül (Fly ash)	3	96,5	2,468	32,07
	4	97,5	2,459	33,80
Ortalamalar			2,464	32,93
PSA	5	97,5	2,467	25,04
	6	90,1	2,477	26,89
Ortalamalar			2,472	25,96
Mermer tozu	7	95,4	2,481	32,07
	8	95,7	2,479	30,34
Ortalamalar			2,480	31,21
Çimento	9	95,9	2,483	32,93
	10	96,9	2,481	26,64
Ortalamalar			2,482	29,79
Kireç	11	93,6	2,464	34,78
	12	96,9	2,461	35,15
Ortalamalar			2,463	34,97



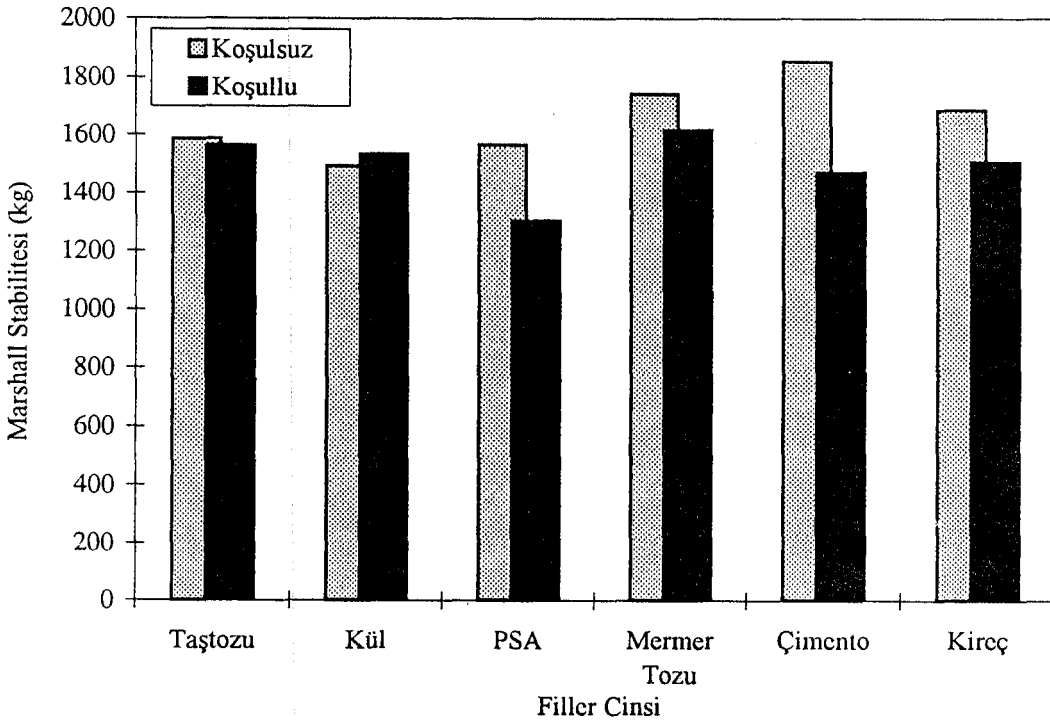
Şekil 6.21. Farklı Filler Malzemelerini İçeren Numunelere ait Serbest Basınç Gerilmeleri

6.3.3. Su hasarı deneyi sonuçları

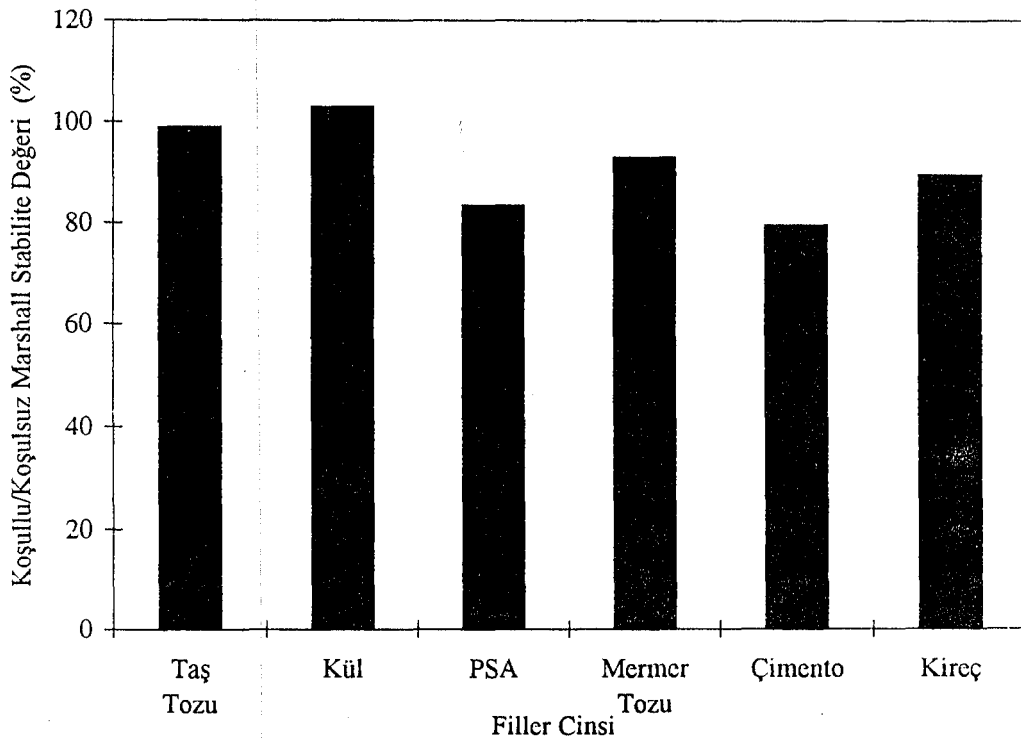
Su hasarı deneyi için hazırlanan numuneler üzerinde marshall stabilitesi ve indirek çekme gerilmesi deneyleri yapılmıştır.

6.3.3.1. Marshall deneyi sonuçları

Koşullu ve koşulsuz numunelere ait Marshall stabilite değerleri Şekil 6.22'de görülmektedir. Kül içeren numunelerin koşullu Marshall stabilite değerleri kül içeren koşulsuz numunelere göre %3 oranında artmıştır. Petrollü sondaj atığı, mermer tozu, çimento ve kireç içeren numunelerin koşullu Marshall değerleri sırasıyla, %13, %7, %21 ve %11 oranında azalmıştır (Şekil 6.23).



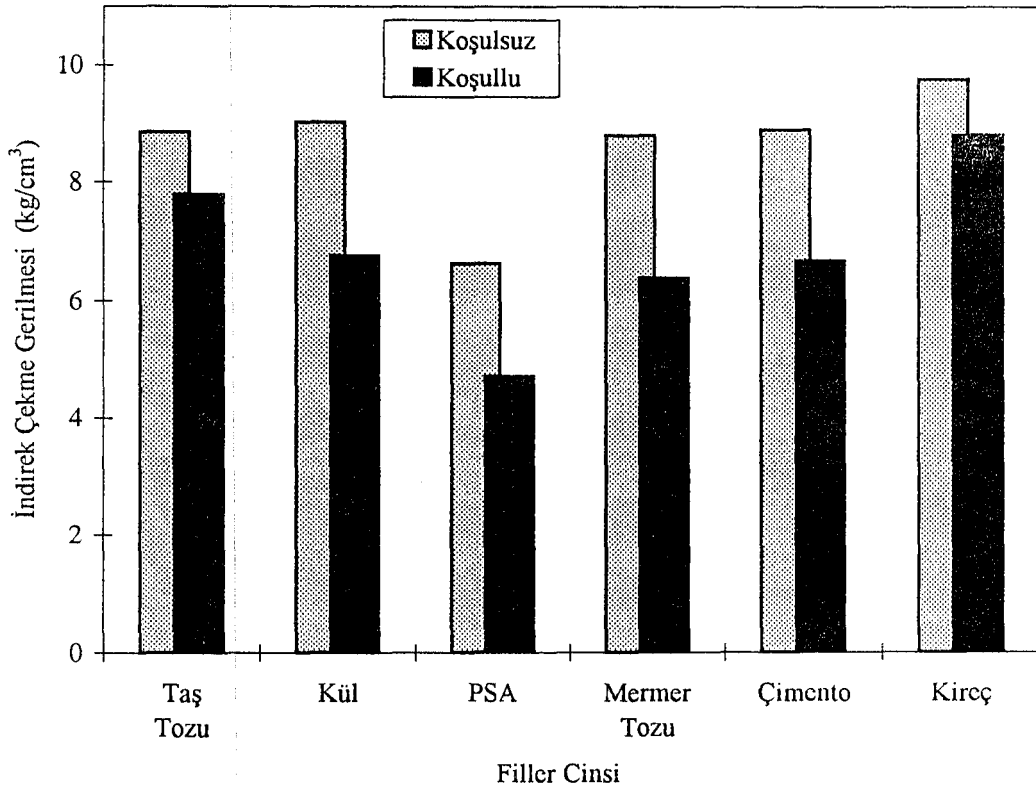
Şekil 6.22. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait Marshall Stabilite Değerleri



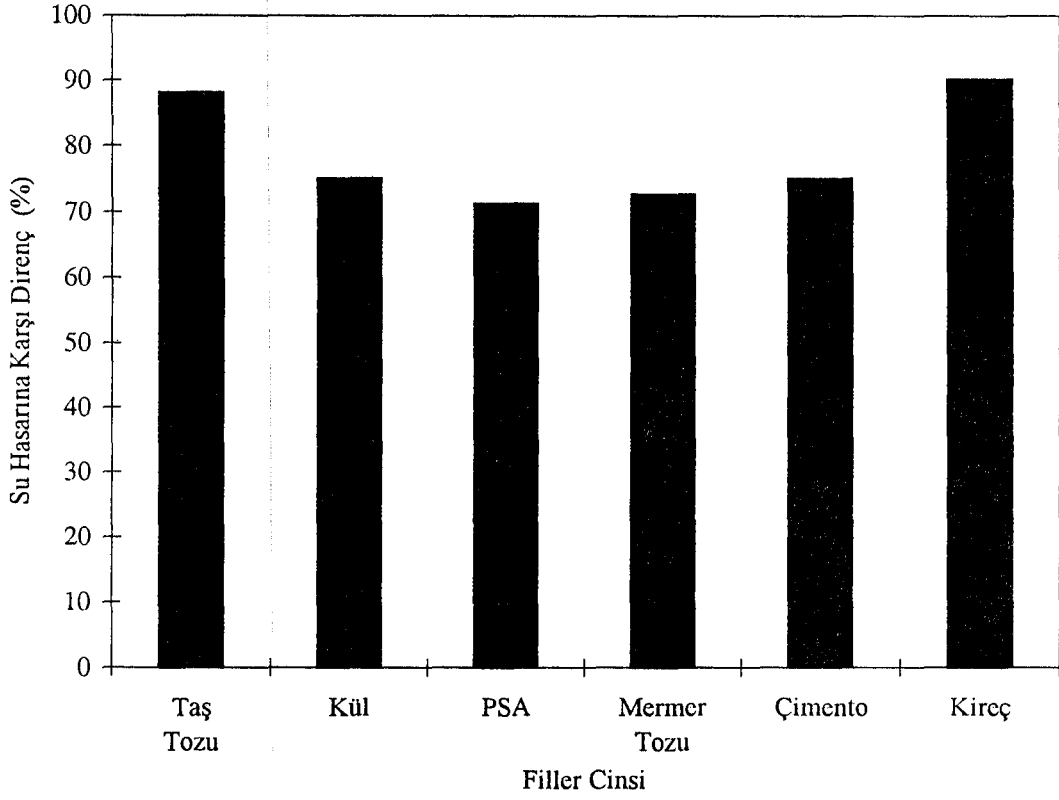
Şekil 6.23. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Koşullu/Koşulsuz Marshall Stabilitesi Değerleri

6.3.3.2. İndirek çekme deneyi sonuçları

Koşullu ve koşulsuz numunelere ait indirek çekme gerilmeleri Şekil 6.24'de verilmiştir. Koşullandırılan bütün numunelerin indirek çekme değerlerinde azalma görülmüştür. Taş tozu, kül, petrolü sondaj atığı, mermer tozu, çimento ve kireç içeren numunelerin su hasarı dirençleri sırasıyla %88, %69, %71, %73, %75 ve %90 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.25). Kireç ilaveli numuneler en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 6.24. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Koşullu ve Koşulsuz Numunelere ait İndirek Çekme Gerilmesi Değerleri



Şekil 6.25. Farklı Filler Malzemeleri İçeren Numunelere ait Koşullu/Koşulsuz İndirek Çekme Değerleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Lastik İlaveli Karışımlara ait Sonuçlar

- Lastik boyutu ve miktarı arttıkça Marshall stabilitesi azalmaktadır. 20-200 ve 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçalarının %5, %10 ve %20 ile 4-20 nolu elekler arasında kalan lastik parçalarının %5 ve %10 olarak ilave edildiği numunelerin Marshall stabilite değerleri limitler içerisinde kalırken, 4-20 nolu elekler arasında kalan lastik parçalarının %20 oranında ilave edildiği numunelerin Marshall stabilite değerleri limit değerinin altına düşmüştür.
- Lastik boyutu ve miktarı arttıkça numunelerin akma değerleri de artmaktadır. Dolayısıyla, numunelerin sünekliliği artmaktadır. 4-20 lastik boyutunun tüm ilave yüzdelerinde (%5, %10, %20) ve 4-200 lastik boyutunun %20 ilavesinde numunelerin akma değerleri sınır değerinin üzerine çıkmıştır.
- Lastik miktarı arttıkça indirek çekme değerleri azda olsa azalmaktadır. En düşük indirek çekme gerilmeleri 20-200 nolu elekler arasındaki lastik parçaları ilave edilen numunelerden elde edilmiştir. En iyi indirek çekme gerilmeleri ise 4-200 nolu elekler arasındaki lastik parçaları ilave edilen numunelerden elde edilmiştir. Kullanılan tüm lastik boyutlarının %5 ve %10 ilavelerinde numunelerin indirek çekme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. %10 oranının üzerindeki lastik ilavelerinde numunelerin indirek çekme değerlerindeki azalma belirgin olarak görülmektedir. Bu sonuçlara dayanarak ince boyuttaki lastik parçaların numunelerin indirek çekme dayanımlarını azalttığını ve dolayısıyla lastik parçalarının granülometrisinin önemli olduğunu söyleyebiliriz.
- 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları ilave edilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden, lastik miktarının arttıkça serbest basınç gerilmesinin azaldığı, şekil değiştirme miktarının ise arttığı görülmektedir. Dolayısıyla, bu numunelerin esneklik ve toklukları önemli ölçüde artmaktadır. %5 ve %10 oranında lastik ilave edilen numunelerin basınç değerleri birbirine oldukça yakındır. %20 lastik ilavesinde ise %60'lık bir azalma olmuştur.

- %5, %10 ve %20 oranında lastik içeren koşullu numunelerin Marshall stabilite değerlerinde sırasıyla %6, %3 ve %5 oranlarında artış görülmektedir. Fakat, %5 lastik ilaveli numunelerin koşullu indirek çekme değerlerinde %11, %10 ve %20 lastik ilave edilen numunelerin koşullu indirek çekme değerlerinde %25 oranında bir azalma olmuştur.
- Su hasarı direncinin belirlenmesi için yapılan Marshall deneyinin numuneler üzerindeki doğru olarak yansıtmadığı, indirek çekme değerinden alınan sonuçların daha sağlıklı olduğu görülmüştür.

7.2. Plastik İlaveli Karışımlara ait Sonuçlar

- Plastik miktarı arttıkça Marshall stabilite değeri de artmaktadır. %20 oranında plastik ilave edilen numunelerin Marshall stabilite değerinde %21'lik bir artış elde edilmiştir.
- Akma değerleri plastik ilavesiyle önemli ölçüde değişmemektedir. Yalnız %20 plastik içeren numunelerin akma değerlerinde %17 oranında bir azalma olmuştur.
- Plastik miktarı arttıkça indirek çekme değerleri de artmaktadır. %5, %10 ve %20 plastik ilavesinde sırasıyla %15, %43 ve %69 oranında artış görülmektedir.
- %5 plastik içeren koşullu numunelerde, koşulsuz numunelere göre %5 oranında bir azalma görülmüştür. Plastik içeren numunelerin katkısız numunelere göre, su hasarı direncini az da olsa arttırdığı görülmektedir.

7.3. Filler Malzemesi Olarak Kullanılan Kül, Petrollü Sondaj Atığı (PSA), Lastik Tozu, Mermer Tozu, Çimento ve Kireç İçeren Karışımlara ait Sonuçlar

- Kullanılan tüm malzemelerle hazırlanan numuneler hacim özgül ağırlıkları birbirine oldukça yakındır. Fakat, lastik tozundan elde edilen karışımların hacim özgül ağırlıkları çok düşüktür. Bunun sebebini, kullanılan miktarın fazlalığına bağlamak mümkündür.
- Lastik tozları hariç tüm numunelerden elde edilen akma değerleri sınırlar içindedir.
- Lastik tozunda, Marshall stabilite değeri taştözuna göre %73 oranında azalmıştır. Çimento, mermer tozu ve kireçli numunelerin Marshall stabilite değerleri taş tozuna göre

sırasıyla %17, %10 ve %6 oranında artmıştır. PSA ve kül içeren numunelerde %6 oranında bir azalma görülmüştür.

- Kireç, kül ve çimento içeren numunelerin indirek çekme değerlerinde taş tozu içeren numunelere göre sırasıyla %10, %1,92 ve %0,45 oranında bir artış, mermer tozu içeren numunelerde ise %0,68 bir azalma olmuştur. Yukarıdaki değerlerden taş tozu, kül, mermer tozu ve çimento içeren numunelerden elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. PSA içeren numunelerin indirek çekme değerlerinde ise %25'lik bir azalma görülmüştür. En iyi çekme gerilmesi kireç içeren numunelerden elde edilmiştir.
- En iyi serbest basınç değeri kireçli numunelerden alınmıştır (%6 oranında artmıştır). Mermer tozu, çimento, kül ve taş tozundan elde edilen değerler birbirine oldukça yakındır. Dolayısıyla, kül ve mermer tozunun asfalt kaplama karışımlarında filler malzemesi olarak kullanılmasında herhangi bir sakınca görülmemektedir. PSA'nın karışımlar üzerindeki olumsuz etkisi serbest basınç deneyi sonucunda da tespit edilmiştir. PSA serbest basınç mukavemetini %27 oranında azaltmıştır. Bunun sebebi ise petrolü sondaj atığının oldukça fazla bentonit kili ve organik madde içermesidir.
- İndirek çekme ve serbest basınç deneylerinden alınan sonuçlar birbirini desteklerken, Marshall deneyinden elde edilen sonuçlar PSA'nın yaptığı olumsuz etkiyi tam anlamıyla yansıtmamaktadır. Dolayısıyla, sıcak karışım kaplama dizaynında kullanılan Marshall metodu kaplamanın mukavemetinin belirlenmesinde yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple, kaplamaların çekme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan indirek çekme gerilmesinin de yapılması sonuçların güvenilirliği açısından isabetli olacaktır.
- Kül içeren numunelerin koşullu Marshall stabilite değerleri koşulsuz numunelere göre %3 oranında artmıştır. Petrollü sondaj atığı, mermer tozu, çimento ve kireç içeren numunelerin koşullu Marshall stabilite değerleri sırasıyla %13, %7, %21 ve %11 oranında azalmıştır. Taş tozu, kül, petrolü sondaj atığı, mermer tozu, çimento ve kireç içeren numunelerin su hasarı dirençleri sırasıyla %88, %69, %71, %73, %75 ve %90 olarak belirlenmiştir. Bu değerler su hasarında sınır değer olan %70'in üzerindedir.

KAYNAKLAR

1. LOUGHEED, T.J., and PAPAGIANNAKIS, A.T., *Viscosity Characteristics of Rubber-Modified Asphalts*. J. of Materials in Civil Eng., ASCE, Vol.8, No.3, pp.153-156, 1996.
2. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, *Araç Lastiği Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Yayın No:2235-ÖİK:365, s.1-37, Ankara, 1990.
3. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, *Lastik ve Plastik Eşya Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Yayın No:2218-ÖİK:362, s.1-36, Ankara, 1990.
4. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, *Plastik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Yayın No:2368-ÖİK:434, s.1-296, Ankara, 1994.
5. ALI, N., CHAN, J.S., SIMMS, S., BUSHMAN, R., BERGAN A.T., *Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.8, No.1, pp.19-25, 1996.
6. TUNCAN, A., TUNCAN, M., KOYUNCU, H., ve SOYAL, A.K., *Petrollü Sondaj Atıkların Yol Alt Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, s.511-520, 1996.
7. AL-ABDUL-WAHAB, H., and AL-AMRI, G., *Laboratory Evaluation of Reclaimed Rubber Asphaltic Concrete Mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.3, No.3, pp.189-203, 1991.
8. KHEDAYWİ, T.S., TAMİMİ, A.R., AL-MASAEID, H.S., and KHAMAİSEH, K., *Laboratory Investigation of Properties Asphalt-Rubber Concrete Mixtures*. Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 216-225, 1994.
9. HEITZMAN, M.A., *State of Practice-Desing and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier*. Fed. Highway Admin. Report, FHWA-SA-92-022, U.S. Dept. of Transp., Washington, D.C., 1992.
10. MCDONALD, C.H., *A New Patching Material for Pavement Failures*. In Highway Res. Rec. 146, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-16, 1966.
11. MORRIS, G.R., and MCDONALD, C.H., *Asphalt-Rubber Stress Absorbing Membranes Field Performance and State-of-the-Art*. In Transportation Research Record 595, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 52-58, 1976.
12. SCHNORMEIER, R.H., *Fifteen-Year Pavement Condition History of Asphalt Rubber Mambranes in Phoenix, Arizona*. In Transportation Research Record 1096, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 62-67, 1986.

13. LALWANI, S., ABUSHIHADA, A., and HALSA, A., *Reclaimed Rubber-Asphalt Blends Measurement of Rheological Properties to Assess Toughness Resiliency, Consistency and Temperature Sensitivity*. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp. 562-579, 1982.
14. ROBERTS, F.L., and LYTTON, R.L., *FAA Mixture Design Procedure for Asphalt-Rubber Concrete*. In Transportation Research Record 1115, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.216-225, 1987.
15. PAMUKÇU, S., *Performance of Rubberized Asphalt with IRM Aggregate*. In the Material Research Center, Material Liaison Program, Lehigh University, Interim Report, Pennsylvania, 1993.
16. STROUP-GARDINER, M., NEWCOMB, D.E. and TANQUEST, B., *Asphalt - Rubber Interaction*. Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 99-108, 1994.
17. ZIMMER, F.V., *Fly Ash as Bituminous Filler*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., 1970.
18. HENNING, N.E., *Evaluation of Lignite Fly Ash as Mineral Filler and Antistrip Agent for Asphalt Concrete*. Report No. Item(2)-73, Twin City Testing and Engineering Laboratory, St. Paul, Minnesota, 1974.
19. SANKARAN, K.S., and RAO, D.R., *The Influence of the quality of Filler in Asphaltic Paving Mixtures*. Indian Roads Congr., 35(1),pp.141-151, 1973.
20. ROSNER, J.G., CHEHOVITS, J.G., and MORRIS, G.R., *Fly Ash as a Mineral Filler and Antistrip Agent for Asphalt Concrete*. Challenge of Change-6th Int. Ash Utilization Symp. Proc., U.S. Dept. of Energy, Morgantown, 1982.
21. SUHEIBANI, A., *The use of Fly Ash as an Asphalt Extender*. PhD Thesis, Univ. of Michigan, University Microfilm International, Ann Arbor, Michigan, 1986.
22. TONS, E., *Fly Ash As an Asphalt Reducer in Bituminous*. Base Courses. Rep. Prepared by the University of Michigan, The Board of Water and Light, Consumer Power Co., and Detroit Edison Co., Michigan, 1986.
23. CROSS, A.S., and FAGER, G.A., *Fly Ash in Cold Recycled Bituminous Pavement*. 73rd. Annu. Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
24. MAZLUMDAR, M., and RAO, S.K., *Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Sand-Asphalt-Sulfur Paving Mixes*. In Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 144-149, 1994.

25. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, *Yollar Fenni Şartnamesi*. Yayın No: 170/2, Ankara, s.435, 1994.
26. OLİVER, J.W., *Modification of Paving Asphalt by Digestion with Scrap Rubber*. In Transportation Research Record 1115, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 216-225, 1987.
27. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Method Bulk Specific Gravity of Compacted Bitüminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
28. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
29. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
30. ÖNAL, M.A. ve KAHRAMANGİL, M., *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, s.1-200, 1993.
31. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Method for Specific Gravity of Semi-Solid Bitüminous Material*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
32. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity Bitüminous Paving Mixtures*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
33. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Methods for Resistance to Plastic Flow of Bitüminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.
34. Annual Book of ASTM Standart, *Road and Paving Materials, Standart Test Methods for Compressive Strength of Bitüminous Mixtures*. Vol. 04.03, Philadelphia, Pa., USA, 1985.

EKLER

EK-1

Agrega ve Bitüm Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

KABA AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIKLARI VE SU ABSORBSİYONU	
Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, g.	2979.4
Doygun-yüzey-kuru malzemenin havadaki ağırlığı, g.	2989.1
Doygun-yüzey-kuru malzemenin sudaki ağırlığı, g.	1878.3
Zahiri özgül ağırlık	2.706
Hacim özgül ağırlık	2.682
Absorpsiyon yüzdesi, %	0.326

İNCE AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIKLARI VE SU ABSORBSİYONU		
Piknometre Ağırlığı, g.	140.8	139.3
Piknometre + su ağırlığı, g.	638.4	636.5
Piknometre + doyun-yüzey-kuru numune ağırlığı, g.	335.5	399.3
Piknometre + numune + su ağırlığı, g.	760.3	799.9
Kuru numune ağırlığı, g.	192.1	257.6
Zahiri özgül ağırlık	2.736	2.735
Hacim özgül ağırlık	2.637	2.667
Absorpsiyon yüzdesi, %	1.372	0.932

MİNERAL FİLLERİN ZAHİRİ AĞIRLIĞI		
Piknometre Ağırlığı, g.	76.3	74.9
Piknometre + su ağırlığı, g.	325.1	323.4
Piknometre + kuru numune ağırlığı, g.	102.9	105.2
Piknometre + numune + su ağırlığı, g.	342.1	342.7
Zahiri özgül ağırlık	2.771	2.755

BİTÜMÜN ÖZGÜL AĞIRLIĞI		
Piknometre Ağırlığı, g.	76.3	74.9
Piknometre + su ağırlığı, g.	325.1	323.4
Piknometre + bitüm, g.	102.9	105.2
Piknometre + bitüm + su ağırlığı, g.	342.1	342.7
Bitüm özgül ağırlığı	2.771	2.755

BİTÜMLÜ KAPLAMA KARIŞIMININ TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIĞI		
Piknometre ağırlığı, g.	801.5	801.1
Piknometre + su ağırlığı, g.	1968.1	1968.1
Piknometre + sıkışmamış bitümlü malzeme ağırlığı, g.	1337.4	1423.7
Piknometre + su + sıkışmamış bitümlü malzeme ağırlığı, g.	2289.1	2343.3
Maksimum teorik özgül ağırlık, g.	2.502	2.502

Kullanılan Agrega için Yapılan Marshall Dizayn Sonuçları

Biriket No	Bitümün Yüzdesi		Biriket Yüksekliği				Havada Ağırlık (g)	Suda Ağ. (g)	Doy. Yüz Kuru Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Hac.Öz. Ağırlık (g/cm ³)	Mak. Teo.Öz. Ağırlık (g/cm ³)	Boşluk (%)	VMA (%)	Asfaltlı a Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzlme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)	
	(%)	(%)	(mm)																	
	W _a	W _b	1	2	3	Ort.														
1	4.00	3.85	60.7	61.0	60.8	60.8	1186.2	701.1	1186.7	485.6	2.443					1.81	1534	1.074	1647	
2	4.00	3.85	59.7	59.7	59.9	59.8	1175.7	699.4	1176.3	476.9	2.465					1.99	1683	1.106	1861	
3	4.00	3.85	61.2	60.8	61.2	61.1	1189.3	704.3	1189.8	485.5	2.450					1.91	1700	1.065	1811	
ORTALAMALAR											2.453	2.547	3.69	11.70	68.46	1.90				1773
4	4.50	4.31	60.4	60.5	60.6	60.5	1189.5	709.0	1190.4	481.4	2.471					2.13	1425	1.084	1545	
5	4.50	4.31	60.5	60.3	60.3	60.4	1181.5	703.4	1182.0	478.6	2.469					2.45	1480	1.087	1609	
6	4.50	4.31	60.4	60.2	60.2	60.3	1187.8	707.3	1188.2	480.9	2.470					2.75	1465	1.09	1597	
ORTALAMALAR											2.470	2.529	2.33	11.51	79.76	2.44				1584
7	5.00	4.76	60.9	61.0	61.2	61.0	1203.4	715.6	1203.7	488.1	2.465					3.33	1374	1.068	1467	
8	5.00	4.76	60.7	60.8	60.9	60.9	1194.0	710.6	1194.4	483.8	2.468					2.62	1312	1.071	1405	
9	5.00	4.76	60.7	60.9	61.1	60.9	1201.6	715.9	1202.0	486.1	2.472					4.03	1310	1.071	1403	
ORTALAMALAR											2.468	2.511	1.71	12.00	85.75	3.33				1425
10	5.50	5.21	61.6	61.8	61.8	61.7	1203.2	712.2	1203.6	491.4	2.449					3.34	1341	1.046	1403	
11	5.50	5.21	61.5	61.5	61.6	61.5	1204.4	713.7	1204.8	491.1	2.452					3.27	1333	1.053	1403	
12	5.50	5.21	61.0	61.6	61.3	61.3	1192.5	705.6	1193.1	487.5	2.446					3.07	1324	1.059	1402	
ORTALAMALAR											2.449	2.494	1.80	13.09	86.25	3.23				1403
13	6.00	5.66	61.9	61.9	61.8	61.9	1169.0	684.2	1169.9	485.7	2.407	iptal				3.31	1277	1.04	1328	
14	6.00	5.66	61.9	61.9	62.0	61.9	1199.4	706.2	1199.7	493.5	2.430					2.94	1203	1.04	1251	
15	6.00	5.66	62.1	62.3	62.1	62.1	1199.8	706.4	1200.6	494.2	2.428					2.76	1194	1.035	1236	
ORTALAMALAR											2.429	2.477	1.94	14.21	86.35	3.00				1272
16	6.50	6.10	62.6	62.7	62.8	62.7	1209.9	710.1	1210.2	500.1	2.419					3.49	1215	1.02	1239	
17	6.50	6.10	62.8	62.9	63.0	62.9	1208.1	710.1	1208.7	498.6	2.423					3.61	1224	1.015	1242	
18	6.50	6.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-					-	-	-	-	
ORTALAMALAR											2.421	2.461	1.63	14.80	88.99	3.55				1241
22	7.00	6.54	63.1	63.2	63.3	63.2	1219.1	712.9	1219.2	506.3	2.408					4.57	1035	1.008	1043	
23	7.00	6.54	61.3	61.6	61.6	61.5	1186.4	695.4	1186.7	491.3	2.415					3.39	1018	1.053	1072	
24	7.00	6.54	61.8	61.9	61.9	61.9	1196.5	701.9	1196.7	494.8	2.418					5.35	1091	1.04	1135	
ORTALAMALAR											2.414	2.445	1.28	15.53	91.75	4.44				1083