

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL'DA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN
BİNDER TABAKASINDA YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat ÜNLÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

EKİM 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL’DA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN BİNDER
TABAKASINDA YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ferhat ÜNLÜ
501081409**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ERGÜN

EKİM 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501081409 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ferhat ÜNLÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İSTANBUL'DA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN BİNDER TABAKASINDA YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat ERGÜN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Şükriye İYİNAM**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12.09.2019

Savunma Tarihi : 09.10.2019





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Kalabalıklaşan dünyamızda her gün daha fazla tüketilen su, petrol, madenler ve ormanlar nedeniyle doğal kaynaklarımız hızla tükenmektedir. Yeniden kullanılma imkanı olan atık maddeleri geri dönüştürerek doğal kaynaklarımızı korumak, çevre kirliliğini önlemek ve ekonomiye tekrar kazandırmak tüm sektör temsilcilerinin, kanun koyucuların, kamu kurum ve kuruluşlarının ortak görevidir. Bu sorumluluk bilinciyle hareket ederek, çalışmakta olduğum İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nde yol yapımında kullanılan asfaltın sürekli ve yüksek hacimlerde kullanılan bir malzeme olduğu, pahalı bir ürün olduğu, doğal kaynaklardan elde edildiği ve geri dönüştürülebilir bir malzeme olduğunu meslek hayatım boyunca tecrübe ettim ve bu konuda çalışma yapmak istedim.

Akademik çalışma sürecinde yaptığım araştırmalardan, laboratuvarda yaptığım deneylerden, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim kişilerden elde ettiğim kazanımları mesleki hayatıma aktarma şansım oldu.

Bu çalışmayı yapmam konusunda beni yönlendiren, lisans eğitimim sırasında kendisinden ders alma fırsatı yakaladığım, yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgilerinden istifade ettiğim danışman hocam Sn. Doç. Dr. Murat ERGÜN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Yoğun çalışma temposuna rağmen tez kapsamındaki deneylerin yapımı konusunda yardımcı olan İsfalt Laboratuvar Şefi Yunus TAŞTAN'a, İsfalt Kalite Kontrol Şefi Süleyman GİRİT'e, titiz ve özverili çalışma anlayışıyla deneylerin her aşamasında bana yol gösteren İsfalt Laboratuvar Sorumlusu Ekrem ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam için gereken zaman konusunda bana anlayış gösteren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Kübra ÜNLÜ'ye teşekkür ederim.

Haziran 2019

Ferhat ÜNLÜ
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Asfaltın Tanımı	2
1.2 Asfalt Endüstrisi	3
1.3 Asfalt Endüstrisinin Çevresel Etkileri.....	4
1.4 Asfaltta Geri Dönüşümün Faydaları.....	5
1.5 Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar	6
1.6 Çalışmanın Amacı	6
1.7 Çalışmada İzlenen Yol	7
2. GENEL BİLGİLER.....	9
2.1 Karayolu Yapısının Tanımı ve Üstyapı Tipleri.....	9
2.2 Esnek Üstyapılar	9
2.2.1 Asfalt betonu (Beton asfalt) kaplamalar	10
2.2.1.1 Aşınma tabakası	10
2.2.1.2 Binder tabakası.....	11
2.2.1.3 Temel tabakası	11
2.2.1.4 Alttemel tabakası.....	11
2.2.2 Yüzeysel (Sathi) kaplamalar	12
2.3 Esnek Üstyapılara Etkiyen Kuvvetler	13
2.3.1 Trafik yüklerinden oluşan mekanik gerilmeler	13

2.3.1.1 Düşey yükler	13
2.3.1.2 Uzunluğuna teğetsel kuvvetler	15
2.3.1.3 Enine teğetsel kuvvetler	15
2.3.1.4 Emme kuvvetleri	16
2.3.2 Sıcaklık ve nemin (İklimin) değişmesinden doğan gerilmeler.....	16
2.4 Esnek Üstyapı İmalatında Kullanılan Malzemeler	16
2.4.1 Agregalar	16
2.4.1.1 Boyut sınıflandırması	17
2.4.1.2 Granülometri sınıflandırması	18
2.4.1.3 Özgül ağırlık sınıflandırması	19
2.4.2 Bitümlü bağlayıcılar	20
2.4.2.1 Katranlar	21
2.4.2.2 Asfaltlar	21
2.5 Bitümlü Sıcak Kaplamaların Üretimi	22
2.5.1 Batch – Mix tipi asfalt plenti	23
2.5.2 Drum – Mix tipi asfalt plenti	27
2.5.2.1 Paralel akımlı tamburda karıştırmalı plentler	27
2.5.2.2 Ters akımlı tamburda karıştırmalı plentler	29
2.6 Yol Üst Yapısında Bozulmalar	31
2.6.1 Oturma, çökme, ondülasyon ve kabarmalar	31
2.6.1.1 Tekerlek izi oluşumları	31
2.6.1.2 Oturma	32
2.6.1.3 Ondülasyonlar	33
2.6.1.4 Kabarmalar	34
2.6.1.5 Çökmeler	34
2.6.2 Çatlaklar	35
2.6.2.1 Enine çatlaklar	35
2.6.2.2 Timsah sırtı çatlaklar	36
2.6.2.3 Boyuna çatlaklar	37
2.6.2.4 Yorulma çatlakları	38
2.6.2.5 Kenar çatlakları	38
2.6.2.6 Yansıma çatlakları	39
2.6.2.7 Kayma çatlakları	39
2.6.3 Ayrılma, ayrışma ve parçalanmalar	40
2.6.3.1 Sökülme	40

2.6.3.2 Çanak şekilli çukurlar	40
2.6.3.3 Soyulmalar	41
2.6.4 Kayma direnci kaybı ve kusmalar.....	41
2.6.4.1 Cilalanma	41
2.6.4.2 Kusma	41
2.7 Asfaltta geri dönüşüm yöntemleri	42
2.7.1 Soğuk düzeltme (Cold planing)	42
2.7.2 Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling)	43
2.7.3 Sıcak yerinde geri dönüşüm (Hot in-place recycling)	44
2.7.3.1 Yüzeysel geri dönüşüm.....	45
2.7.3.2 Yeniden karıştırma yöntemi.....	45
2.7.3.3 Yeniden kaplama yöntemi	45
2.7.4 Soğuk geri dönüşüm (cold in-place recycling)	46
2.7.4.1 Soğuk yerinde geri dönüşüm.....	46
2.7.4.2 Soğuk merkezi plentte geri dönüşüm.....	47
2.7.5 Tam derinlikten geri kazanma.....	47
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
3.1 RAP Oranlarının Seçimi.....	49
3.2 RAP Malzemesinin Temini	50
3.2.1 Kaplamanın kazılması ve sökülmesi.....	50
3.2.2 Malzemenin konkasörde kırılarak boyutlarının düşürülmesi.....	51
3.2.3 Depolama	53
3.3 Marshall Deneyleri	53
3.3.1 RAP malzemesinin içeriğinin belirlenmesi.....	54
3.3.2 RAP malzemesinin granülometrisinin belirlenmesi	55
3.3.3 Bitüm deneyleri.....	56
3.3.3.1 Penetrasyon deneyi	56
3.3.3.2 Özgül ağırlık deneyi.....	56
3.3.4 Karışım tasarımı yapılması	57
3.3.4.1 RAP katkısız karışım tasarımı.....	58
3.3.4.2 %15 RAP katkılı karışım tasarımı.....	59
3.3.4.3 %30 RAP katkılı karışım tasarımı.....	60
3.3.4.4 %45 RAP katkılı karışım tasarımı.....	61
3.3.5 Asfalt Betonu Numunelerinin Hazırlanması.....	62
3.3.5.1 Ocak malzemelerinin büyük elekte ayrılması	63

3.3.5.2 Agregaların tartılması.....	63
3.3.5.3 Bitüm ve agreganın karıştırılması	63
3.3.5.4 Briketlerin sıkıştırılması	64
3.3.5.5 Numunelerin boşluk ve yoğunluk değerlerinin bulunması	64
3.3.5.6 Marshall test cihazı ile stabilite-akma tayini.....	67
3.3.5.7 Optimum bitüm oranı tayini	73
3.3.5.8 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	73
3.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi	80
3.4.1 Numunelerin hazırlanması	80
3.4.2 Kuru numune işlemleri.....	80
3.4.3 Koşullu numune işlemleri	80
3.4.4 Sonuçların hesaplanması	81
3.4.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	85
3.5 Tekerlek İzi Deneyi	86
3.5.1 Numunelerin hazırlanması	87
3.5.2 Sonuçların Hesaplanması	88
3.5.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	90
3.6 Karışımların Maliyet Hesabı	91
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	103

KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü Sıcak Kaplama
°C	: Santigrat derece
Cm	: Santimetre
ÇŞB	: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DÇM	: Dolaylı Çekme Mukavemeti
Gr	: Gram
İSFALT	: İstanbul Asfalt Fabrikaları San. Ve Tic. A.Ş
Mm	: Milimetre
Kg	: Kilogram
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement/Yeniden Kullanılan Asfalt Kaplama



SEMBOLLER

D_p	: Hacim Özgöl Ağırlık
D_T	: Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık
G_i	: İnce Agregada özgöl ağırlığı
G_{ib}	: İnce agregada hacim özgöl ağırlığı
G_f	: Filler özgöl ağırlığı
G_k	: Kaba Agregada özgöl ağırlığı
G_{kb}	: Kaba agregada hacim özgöl ağırlığı
G_{sb}	: Agregada Karışımı Hacim Özgöl Ağırlığı
SG_{dky}	: Doygun-kuru yüzey özgöl ağırlık
SG_h	: Hacim Özgöl Ağırlık
SG_z	: Zahiri (görünür) özgöl ağırlık
WTS_{hava}	: 1000 yük devri başına mm cinsinden tekerlek izi eğimi
VFA	: Asfaltla dolu boşluk
V_H	: Boşluk
VMA	: Agregalar arası boşluk



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Türkiyede satıl tipine göre karayolu Uzunluğu [4].	2
Çizelge 3.1 : Rap malzemesi agrega elek analizi sonucu.	55
Çizelge 3.2 : Bitüm Deney Sonuçları.	57
Çizelge 3.3 : KTŞ binder tabakası granülometri limitleri.	57
Çizelge 3.4 : RAP katkısız karışım granülometrisi.	58
Çizelge 3.5 : % 15 RAP katkılı karışım granülometrisi.	59
Çizelge 3.6 : % 30 RAP katkılı numune karışım granülometrisi.	60
Çizelge 3.7 : Çizelge % 45 RAP Katkılı karışım granülometrisi.	61
Çizelge 3.8 : KTŞ asfalt betonu tasarım kriterleri [41].	63
Çizelge 3.9 : Ocak ve RAP agregaları özgül ağırlıkları.	65
Çizelge 3.10 : Katkısız numuneye ait marshall deney sonuçları.	69
Çizelge 3.11 : %15 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.	70
Çizelge 3.12 : %30 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.	71
Çizelge 3.13 : %45 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.	72
Çizelge 3.14 : Optimum bitüm yüzdesindeki numunelerin marshall değerleri.	77
Çizelge 3.15 : RAP katkısız numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.	83
Çizelge 3.16 : %15 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.	83
Çizelge 3.17 : %30 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.	84
Çizelge 3.18 : %45 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.	84
Çizelge 3.19 : Binder tabakası DÇM Deneyi şartname değerleri [41].	85
Çizelge 3.20 : KTŞ asfalt betonu tasarım kriterleri.	89
Çizelge 3.21 : Tekerlek İzi Deneyi sonuçları.	90
Çizelge 3.22 : RAP katkısız karışımın 1 tonu için maliyet analizi.	92
Çizelge 3.23 : %15 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.	93
Çizelge 3.24 : %30 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.	93
Çizelge 3.25 : %45 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.	94



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Saroz Körfezi'nde taş ocaklarının sebep olduğu doğa tahribatı [10].	4
Şekil 2.1 : Karayolu üstyapısı [16].	9
Şekil 2.2 : Esnek Üstyapı görünüşü [17].	10
Şekil 2.3 : Sathi kaplama serme ve sıkıştırma uygulaması.	13
Şekil 2.4 : Tekerlek yüklerine göre değme alanları ve gerilme dağılışları [19].	14
Şekil 2.5 : Kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altında bozuluşu.	15
Şekil 2.6 : Farklı boyut ve şekilde agregalar.	17
Şekil 2.7 : Agregada boşluklarının su ile dolu olduğu farklı durumlar [21].	20
Şekil 2.8 : Batch-mix tipi asfalt plantleri (İsfalt Habibler Fabrikası).	24
Şekil 2.9 : Batch Tipi Plantin Ana Bölümleri [28].	26
Şekil 2.10 : Paralel Akımlı Tambur Ana Üniteleri [28].	28
Şekil 2.11 : Paralel Akımlı Tambur Karıştırıcı [28].	29
Şekil 2.12 : Ters akımlı tambur karıştırıcı [28].	30
Şekil 2.13 : Esnek üstyapılarda tekerlek izi türü yol bozulması [25].	32
Şekil 2.14 : Esnek üstyapılarda Ondülasyon Türü Yol Bozulması [16].	33
Şekil 2.15 : Esnek üstyapılarda Kabarma Türü Yol Bozulması [30].	34
Şekil 2.16 : Esnek üstyapılarda çökme şeklinde yol bozulması [13].	35
Şekil 2.17 : Esnek Üstyapı kaplamalarında enine çatlaklar [31].	36
Şekil 2.18 : Esnek Üstyapılarda timsah sırtı türü yol bozulmaları.	37
Şekil 2.19 : Esnek üstyapılarda boyuna çatlak şeklinde yol bozukluğu [32].	38
Şekil 2.20 : Esnek Üstyapılarda yansıma çatlağı görünümü [30].	39
Şekil 2.21 : Esnek üstyapılarda sökölme şeklinde yol bozulması [30].	40
Şekil 2.22 : Soğuk Düzeltme (Cold Planing) uygulaması [34].	43
Şekil 2.23 : Sıcak yerinde dönüşüm uygulaması [36].	45
Şekil 2.24 : Soğuk yerinde geri dönüşüm uygulaması [13].	46
Şekil 2.25 : Tam derinlikten geri kazanma yöntemi şematik gösterimi [30].	47
Şekil 3.1 : Asfalt kazıma makinesi çalışma görüntüsü [37].	51
Şekil 3.2 : Agregada boyutlarının düşürülmesi için kullanılan konkasörler	52

Şekil 3.3 : Asfalt Analizatör Makinesi Görünümü.	54
Şekil 3.4 : Rap Malzemesi Agregalarının Yıkanması.....	55
Şekil 3.5 : RAP katkısız numune granülometri grafiği.....	58
Şekil 3.6 : % 15 RAP katkılı karışım granülometri grafiği.	59
Şekil 3.7 : % 30 RAP katkılı karışım granülometri grafiği.	60
Şekil 3.8 : % 45 RAP katkılı karışım granülometri grafiği.	61
Şekil 3.9 : Tüm karışımlara ait granülometri grafiği.	62
Şekil 3.10 : Deney numunelerinin sıkıştırıldığı Marshall Tokmağı.	64
Şekil 3.11 : Deney numunelerinin tartım işlemleri.....	65
Şekil 3.12 : Marshall test cihazında numunelerin akma ve stabilite ölçümü.....	68
Şekil 3.13 : Karışımlara ait bitüm oranı – boşluk yüzdesi grafiği.	73
Şekil 3.14 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi grafiği. .	74
Şekil 3.15 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi grafiği.	75
Şekil 3.16 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Akma grafiği.	75
Şekil 3.17 : Karışımlara ait bitüm oranı-stabilite grafiği.	76
Şekil 3.18 : Karışımlara ait agregalar arası boşluk yüzdesi grafiği	77
Şekil 3.19 : Karışımlara ait Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi grafiği.	78
Şekil 3.20 : Karışımlara ait Akma grafiği.....	79
Şekil 3.21 : Karışımlara ait Stabilite grafiği	79
Şekil 3.22 : Koşullu numunelerin suda bekletilmesi görünümü.....	81
Şekil 3.23 : Marshall test cihazında numunelere eksenel yük uygulanması.....	82
Şekil 3.24 : Kuru ve koşullu numunelerin Ortalama Çekme Mukavemeti değerleri	85
Şekil 3.25 : Karışımlara ait Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı grafiği.....	86
Şekil 3.26 : Hamburg modeli tekerlek izi test makinesi görünümü.....	87
Şekil 3.27 : Deney numunelerinin kalıba yerleştirilmesi.....	88
Şekil 3.28 : Karışımlara ait Tekerlek İzi Oturma Yüzdesi (PRD) grafiği	91
Şekil 3.29 : Karışımların 1 ton üretim maliyetleri	94

İSTANBUL'DA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN BİNDER TABAKASINDA YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Dünyamızda tabii kaynakların sonsuz olmadığı ve dikkatlice kullanılmadığı takdirde birgün tükeneceği akıldan çıkarılmamalıdır. İnsan nüfus artışına paralel olarak artan tüketim ve bu tüketim sonucu ortaya çıkan atıkların kontrolsüzce doğaya bırakılması ekolojik dengeyi bozarak doğaya zarar vermektedir. Yeniden değerlendirilme imkanı olan atıklar çeşitli fiziksel veya kimyasal işlemlerden geçirilerek geri dönüştürülebilir. Bu sayede hem doğal kaynakların korunması hem de ekonomik değeri olan atık malzemelerin ekonomiye kazandırılmaları sağlanmış olur. Gelişmiş ülkelerin birçoğunda atık malzemelerin geri dönüşümünü teşvik eden ve geri dönüşümü mümkün olan maddelerin atılmasını yasaklayan yasal düzenlemeler getirilmiştir. Kalkınma çabasında olan ve ekonomik zorluklarla karşı karşıya bulunan gelişmekte olan ülkelerin de doğal kaynaklarından verimli bir şekilde faydalanabilmek ve doğal kaynaklarını korumak için atık israfına son vermeleri gerekmektedir. Bu sebeple ekonomik değeri olan atık malzemeleri geri dönüştürerek yeniden kullanımı sağlanmalıdır.

Asfalt sektöründe kazınmış asfaltın geri dönüştürülerek yeniden kullanımı ekonomik ve ekolojik açıdan büyük faydalar sağlamaktadır. Asfalt kaplamalar genel olarak agrega ve bitümden oluşmaktadır. Asfalt kaplamaların ortalama % 95-97 sini oluşturan agreganın geri dönüşümü, ülkemizde giderek azalan doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Asfalt kaplamanın geri kalan %3-5 lik kısmını oluşturan bitüm, pahalı bir ürün olması sebebiyle maliyet olarak daha büyük bir yüzdeye sahiptir. Bitüm ithal bir ürün olması, pahalı bir ürün olması ve yoğun kullanımının dışa bağımlılığa sebebiyet vermesi nedeniyle, geri dönüştürülmesi halinde ekonomik açıdan ciddi katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, İstanbul Avrupa Yakası'nın çeşitli bölgelerinde yol bakım, onarım, tamirat, yenileme, hatalı imalat gibi nedenlerle yollardan kazınan asfalt betonu kaplama malzemesinin geri dönüştürülerek binder tabakasında yeniden kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kazınmış asfalt kaplama geri dönüşüm amacıyla yeni agrega ve yeni bitümden oluşan sıcak karışıma ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılmıştır. Bu karışımlara marshall deneyleri, tekerlek izi deneyleri ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri uygulanarak, binder tabakasında geri dönüştürülmüş asfalt kullanımının kaplamanın performansına etkisi araştırılmıştır.

Karayolları Teknik Şartnamesi Kısım 414'te, kazınmış asfalt kaplamalar ile hazırlanacak olan sıcak karışımların aşınma tabakasında kullanılamayacağı açıkça yazılmıştır. Bu sebeple, bu çalışmada kazınmış asfalt malzemesinin geri dönüşümü binder tabakası için incelenmiştir. Yine KTŞ Kısım 414'te, bitümlü sıcak karışım imalatında ağırlık olarak %25'ten fazla RAP malzemesi kullanılamayacağı, ancak bu oranın kullanılacak plent tipi ve gençleştirici katkıları ile artabileceği belirtilmektedir.

Eski asfalt kaplamalar üretim sırasında ve servis ömürleri boyunca yaşlanarak zamanla kimyasal değişikliğe uğradığı için, kazınan asfalt malzemenin yeni bitümlü sıcak karışımlara yüksek oranlarda karıştırılması gençleştirici katkılarla mümkün olabilmektedir. Asfalt gençleştirici katkıları kazınmış asfalt malzemenin geri dönüşümündeki ekonomik avantajları ortadan kaldıracaktır. Bu sebeple bu çalışmada gençleştirici katkı kullanılmayacak şekilde, kazınmış asfalt kaplama yeni karışıma ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranlarında karıştırılmıştır. Bu oranlar, ilave edilecek RAP malzemesi agrega ağırlığının, toplam agrega ağırlığına oranıdır. %15, %30 ve %45 karışım numuneleri ile kazınmış asfalt kaplama içermeyen numunelere Marshall deneyleri, tekerlek izi deneyleri ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri uygulanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, kazınmış asfalt betonu kaplamaların geri dönüşüm yöntemleri ile bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılmasının, yeni agrega ve bitüme olan ihtiyacı azalttığı için doğal kaynakların korunduğu, daha az malzeme kullanımı ile birlikte kamu kaynaklarının korunarak ülke ekonomisine katkı sağlandığı görülmüştür. Ayrıca yeni agrega ve bitümün üretimi için harcanan elektrik, petrol, doğalgaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının üretiminde oluşan çevresel etkiler ile kazınmış asfalt kaplamanın atık olarak doğaya atılmasında oluşan çevresel etkilerin azaldığı tesbit edilmiştir.

Gençleştirici katkıların kullanılmasının, ekonomik olarak geri dönüşümün hangi oranlarına kadar kullanılabilirliği bu çalışmanın konusu olmasa da, bu katkıları kullanarak yüksek oranda kazınmış asfalt malzemeyi geri dönüştürmenin çevre ve doğal kaynaklar açısından sağlayacağı faydanın ekonomik fayda yanında daha büyük olduğu aşikardır.

RESEARCH ON REUSABILITY OF SCRAPED ASPHALT PAVEMENTS ON BINDER COURSE IN ISTANBUL

SUMMARY

It should be borne in mind that natural sources are not infinite, and unless they are used cautiously, they will be drained away one day. Consumption which increases parallel to population increase and disposing of the waste which is resultant of that consumption in nature unrestrainedly give harm to the nature.

The transportation demand which increases every year necessitates building of new roads and renewal of existing roads. Both at building and renewal phases, asphalt is one of the road construction materials which affect the cost significantly. From production to application to roads, every phase of asphalt necessitates tremendous care and information. If it is taken into account that 100 million dollars are spent for asphalt only in Istanbul every year, the importance of using asphalt in the right places properly becomes even more evident.

Because asphalt is obtained by distilling petroleum, countries which have no opportunity to produce petroleum are obliged to import petroleum. Turkey is a country which imports petroleum, and it imports more than 20 million tons of petroleum every year. Because Turkey is not a country which is not rich with petroleum, a solution to this problem has to be found.

Those wastes which have the possibility of reusability can be recycled by being put through physical and/or chemical process. By this means, protection of natural sources as well as returning those waste materials which have economic value to the economy will be ensured. In many of the developed countries legislative regulations which encourage recycling of waste materials and which forbid throwing away materials which are recyclable have been carried into effect.

The pavements which deteriorate in time are rehabilitated by maintenance and repair operations. Nevertheless, pavements are going to need major repairs due to the increase in deteriorations because of traffic, environmental and climate conditions. It is extremely important with regards to using our sources properly from the economic point of view that the material which is obtained by scraping off from the decaying parts of the existing pavements is used in the production of hot bituminous mixture to be produced. Taking into consideration the dates when the highways and important national highways are to be opened to the traffic, it is clear that the pavement rehabilitation activities are going to be at the top of the agenda today and in the years ahead. Under these circumstances, it is extremely important in terms of reducing the costs as well as protection of the environment that bituminous binders and aggregates in scraped old hot bituminous mixture, which have high economic value, are used in road construction after certain procedures.

The fact remains that, in the 5 to 10 years ahead, we are going to be confronted with the urgency to utilize waste materials in road construction in Turkey on the grounds

that aggregate reserves will be depleted rapidly, and foreign-source dependency will increase in terms of bitumen, and environmental problems will come into prominence even more.

Those developing countries which make an effort to develop, and which are facing economic difficulties should also put an end to the improvidence of waste materials in order to be able to make use of their natural sources efficiently and to protect their natural sources. For this reason, reusability of waste materials which have economic value through recycling should be provided.

When raw material requirements in large quantities and waste materials they bring out are taken into account, highway sector is the main sector to be considered most among all the sectors with regard to recycling application areas.

The environmental impacts of the asphalt industry are quite a lot. Those impacts are seen in the quarries where aggregate which is one of the constituents of asphalt pavement is mined, in the plants where bitumen is produced and in the plants where aggregate and bitumen are mixed. Atmospheric pollution, water contamination, noise and waste materials are the main ones of those impacts.

Environmental impacts also originate in result of the production of energy sources such as electricity, petrol, natural gas and and charcoal used for the production of bitumen and aggregate, which are raw materials. Of those impacts, especially atmospheric pollution should be taken in hand.

During the recent years the greenhouse gases, one of the reasons of which is also asphalt industry, has been affecting the reflections of sun rays and causing global warming by creating a greenhouse effect. Global warming is one of the biggest environmental problems of ours, and it threatens our future in many ways as a chain reaction such as melting of icebergs, climate change and impairment of agricultural activities.

In asphalt sector, reusing scraped asphalt by recycling it provides great advantages ecologically and economically. Asphalt pavement is generally constituted by aggregate and bitumen. Recycling of aggregate, which constitutes approximately 95-98% of asphalt pavement, has great importance in terms of conservation of natural sources, which gradually decreases in our country; prevention of environmental pollution and gaining it to the economy. On the other hand, bitumen, which constitutes the remaining 3-5% of asphalt pavement has a greater percentage costwise because it is an expensive product. It will provide substantial contributions economically to recycle bitumen because it is an imported product, it is an expensive product and using it in great quantities will cause foreign-source dependancy. At the same time, environmental impacts emerging in the course of the production of bitumen will be decreased.

In this study, it has been researched if the asphalt pavement materials scraped from roads in various sections of the European side of Istanbul due to the reasons such as road maintenance, restoration, repairment, renewal and manufacturing defects could be recycled and reused on binder course.

With the intention of recycling, scraped asphalt pavement has been mixed to the hot mixture composed of the new aggregate and the new bitumen in different proportions. Marshal tests, wheel tracking tests and indirect tensile strength tests have been applied, and the effect on the pavement performance of using recycled asphalt on binder course has been researched.

In the Highway Technical Specification Section 414, it has been clearly written that the hot mixtures which will be prepared by using scraped asphalt pavement cannot be used at wearing surface coat. Therefore, recycling of scraped asphalt material has been researched for binder course in this research. Again in the Highway Technical Specification Section 414, it has been indicated that RAP material cannot be used more than 25% in weight in the production of hot mixture with bitumen, but this proportion can be increased by using plant type and rejuvenating additives.

Because old asphalt pavements undergo chemical changes in time by ageing during their production and service lives, it is only possible for the scraped asphalt material to be mixed in the hot mixture with the new bitumen by using rejuvenating additives.

Rejuvenating additives for asphalt might eliminate economic advantages in the recycling of scraped asphalt material. For that reason, scraped asphalt pavement has been mixed in the new mixture at the rates of 15%, 30% and 45% in weight not using rejuvenating additives. These rates are the rates of RAP material aggregate weight to the total aggregate weight. Marshall tests, wheel tracking tests and indirect tensile strength tests have been applied to the samples which do not contain scraped asphalt pavement, and the results obtained have been compared with 15%, 30% and 45% mixture samples.

Although in what proportion rejuvenating additives can be used in recycling from the economic point of view is not the topic of this study, it is clear that recycling scraped asphalt material by using those additives in high proportions is more beneficial in terms of environment and natural resources than economic benefit.

1. GİRİŞ

Dünyamızda hammadde kaynakları hızla azalmakta ve oluşan atık maddeler doğaya zarar vermektedir. Atıkların düzenli depolama bölgelerinde gömülmesi veya yakılması günümüzde en çok kullanılan yöntemlerdir. Fakat bu yöntemler çevre ve yer altı sularının kirlenmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle atık malzemelerin geri dönüştürülerek yeniden kullanımının sağlanması konusunda son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Büyük miktarlarda hammadde gereksinimi ve ortaya çıkardığı atık maddeler düşünüldüğünde, karayolu sektörü geri dönüşüm uygulama alanları içinde en çok üzerinde durulması gereken sektörlerin başında gelmektedir [1].

20. yüzyıl başlarında insanlar ham petrolden asfalt üretmeyi keşfettikten sonra, otomobil sayısının günümüze dek hızla artması ile birlikte yeni yol yapımına yani asfalta olan talep aynı şekilde artmıştır. Asfalt hem ucuz hem de dünyada oldukça fazla bulunan bir malzeme olması sebebiyle modern yollar için vazgeçilmez bir kaynaktır.

Her yıl dünyada 1,5 milyar ton asfalt kaplama üretimi yapılmakta ve bu üretim için 1,425 milyar ton agrega ile 75 milyon ton bitüm tüketilmektedir. Yollardan kazınan asfalt betonu kaplamalar ise atık olarak doğaya kontrolsüz bir şekilde bırakılmaktadır. ABD’ de her yıl yaklaşık 500 milyon ton asfalt üretiminin %15’lik kısmı geri kazanılan asfalt kaplama ile yapılmaktadır. Bu sayede yılda 300 milyon dolar civarında tasarruf yapılmakta, doğal kaynaklar korunmakta ve çevre kirliliği azalmaktadır [2].

Ülkemizde yılda yaklaşık 15 milyon ton asfalt kaplama üretilmektedir. Bu üretimin yaklaşık %72’si olan 10 milyon ton asfalt kaplama şehir içi yol yapımında kullanılmakta ve bu miktar giderek artmaktadır. Asfaltta geri kazanım en verimli ve etkin şekilde şehir içi uygulamalarda sağlanabileceğinden, yerel yönetimler geri kazanım konusunda daha aktif rol üstlenmeli, örnek ve öncü olmalıdırlar. Şehir içi yollar için bir yılda 10 milyon ton asfaltın %1’lik bir kısmının geri dönüştürülmesi halinde her yıl 100 bin ton asfalt atığı oluşmayacak, taş ocaklarından 100 bin ton daha az agrega çıkarılacak, 3 bin ton daha az bitüm tüketilecektir. Bu sayede çevre kirliliği aynı oranda azalacak, doğal kaynaklar korunmuş olacak ve asfalt üretim maliyetleri düşürülerek ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır [2].

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin ekonomik kaynaklarını en doğru şekilde değerlendirmesi ve ulaştırma yatırımlarının mevcut ve geleceğe dönük ihtiyaçları karşılayacak şekilde planlamasının yapılması ve mümkün mertebe ulusal kaynaklara dayalı olması gerekmektedir [3]. Çizelge 1.1’de Türkiye’de satıh tipine göre karayolu uzunluğu verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Türkiyede satıh tipine göre karayolu Uzunluğu [4].

Yol Tipi	Asfalt Betonu (km)	Sathi Kaplama (km)	Diğer Yollar (km)	Toplam (km)
Otoyollar	2159	-	-	2159
Devlet Yolları	17520	13115	386	31021
İl Yolları	4403	26218	3532	34153
Toplam	24082	39333	3918	67333

TÜİK verilerine göre Türkiye’de karayollarının 1970’lerde yük taşımacılığında payı %61, yolcu taşımacılığında %95 ve 2003 yılında yük taşımacılığında %92, yolcu taşımacılığı %95’tir. Günümüzde karayollarının hem yük hem yolcu taşımacılığındaki payı 1970’lere göre oldukça fazladır [5].

1.1 Asfaltın Tanımı

Asfalt kelimesinin eski Akadca’da bulunan asfaltik teriminden geldiği düşünülmektedir. Yunanca’da “sağlam ve sabit yapmak” anlamında kullanıldığı düşünülen “asfaltik” terimi Fransızca’ya “asphalte” ve İngilizce’ye “asphalt” olarak geçmiştir. Asfalt malzemesi dünyamızda en eski ve en çok kullanım alanına sahip malzemelerden biri olup, uygarlık boyunca insanların kullanımında olmuştur.

Asfaltın tarihi oldukça eskidir. M.Ö 6000 yıllarında Sümerliler asfaltı üretmiş ve kullanmıştır. Mısırlılar M.Ö 2600 yıllarında asfaltı su geçirmez malzeme olarak kullanmış, asfalt tarih boyunca genel olarak su yalıtım malzemesi, yapılarda harç kaplama malzemesi ve gemilerde ziftleme malzemesi gibi farklı amaçlarla kullanılmıştır [6].

Asfaltın yol malzemesi olarak kullanımı Avrupa ve Amerika’da 19. yüzyıldan sonra görülmektedir. İlk kez 1824 yılında Fransa’nın Paris şehri Champs-Élysées bulvarında yol malzemesi olarak asfalt blokların kullanıldığı görülmektedir. İyi derecelendirilmiş modern yol asfaltı ilk defa Belçika’lı kimyager Edward Smedt tarafından 1872 yılında geliştirilerek New York 5. Caddesi’nde kullanılmıştır [7].

Bu yıllarda asfalt genel olarak doğal yollardan jeolojik tabakalar arasında yumuşak ve işlenebilir bir halde, Trinidad Adası’ndaki Trinidad Gölü birikintisinde, Venezuela Bermuda Gölü ve tüm Kanada’da katran kumu olarak bulunmaktadır. Doğal asfalt yumuşak asfalt olarak ta adlandırılır ve 20. Yüzyılın başlarına kadar yoğun bir şekilde kullanılmıştır [6].

Rafine edilmiş petrol asfaltı bitüm olarak adlandırılmaktadır. 20. yüzyıla kadar yol yapımında genel olarak doğal asfalt ve bir miktar rafine edilmiş petrol asfaltı kullanılmaktaydı. Yol yapımında tamamen bitüm kullanılması 1907 yılından sonra başlamıştır [7].

1.2 Asfalt Endüstrisi

Türkiye’de bitümlü sıcak karışım (BSK) imalatı 1956-1957 yılları arasına başlamıştır. İlk asfalt plenti özel sektör tarafından edinilmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 1960 yılında bir asfalt plenti satın almış ve sonraki yıllarda özel sektörde çeşitli firmalar tarafından düşük kapasiteli plantler kullanılmaya başlanmıştır. 1960-1970 yılları arasında asfalt kaplamalı yolların yaygınlaştırılması için gösterilen çaba sonucu 1970 yılında devlet yolu uzunluğu 17.124 km’yi bulmuştur. 1970’li yıllarda çevre yolların yapımının başlaması ile asfalt endüstrisi büyük atılım yapmış, özel sektörde birçok firma BSK üretimi için makine parklarını oluşturmuş ve asfalt sektöründe yerini almıştır [8].

Otomotiv endüstrisinin gelişimi sonucu yük ve yolcu taşımacılığında karayolunun payı artmasıyla birlikte asfalt kaplamalı yol ihtiyacı da artmıştır. 1980 yılı başında asfalt kaplamalı karayolu uzunluğu 34.205 km seviyelerine gelmiştir. İlerleyen yıllarda yeni projeler ve otoyol hamlesi ile birlikte Türk asfalt endüstrisinde büyük ilerleme sağlanmış, yeni teknolojilerin transferi yapılmış, makine parkı ve plant sayısında artış olmuştur. 2000’li yıllarda artan trafik yoğunluğu kapasite artışını zorunlu kılmış ve

bölünmüş yol yapımı çalışmalarına başlanmıştır. Günümüzde de asfalt kaplama yol imalatı yoğun bir şekilde devam etmektedir [8].

Türkiye’de her yıl 15 milyon ton civarında bitümlü sıcak karışım üretilmektedir. Bu üretimin 3-4 milyon tonluk kısmı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yol kaplamalarında, 1 milyon tonluk kısmı özel sektör tarafından ve geri kalan 10 milyon tonluk kısmı belediyeler tarafından yol kaplamalarında kullanılmaktadır [9].

Yol yapımı, yenilenmesi, bakım ve onarımı gibi aşamalarda maliyeti etkileyen en önemli malzemelerden birisi asfalttır. Sadece İstanbul için her yıl 100 milyon dolar değerinde asfalt malzemesi kullanılmaktadır [6].

1.3 Asfalt Endüstrisinin Çevresel Etkileri

Asfalt endüstrisinin çevresel etkileri oldukça fazladır. Bu etkiler asfalt kaplamanın bileşenlerinden agregaların çıkarıldığı taş ocaklarında, bitümün üretildiği tesislerde ve agrega-bitüm karışımının yapıldığı plantlerde görülür. Hava kirliliği, su kirliliği, gürültü ve atıklar bu etkilerin başlıcalarıdır.

Şekil 1.1’de taş ocaklarının agrega temini için Saroz Körfezi’nde doğaya verdiği zarar açıkça görülmektedir.



Şekil 1.1 : Saroz Körfezi’nde taş ocaklarının sebep olduğu doğa tahribatı [10].

Ayrıca hammadde olan bitüm ve agreganın üretimi için kullanılan elektrik, petrol, doğalgaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının üretiminde de çevresel etkiler oluşur. Bu etkilerden hava kirliliği özellikle ele alınmalıdır. Son yıllarda asfalt endüstrisinin de

sebebi olduğu sera gazları güneş ışınlarının yansımalarını etkilemekte ve sera etkisi oluşturarak ve küresel ısınmaya sebebi olmaktadır. Küresel ısınma çağımızın en büyük çevre sorunlarından olup, buzulların erimesi, iklimlerin değişmesi ve tarımsal faaliyetlerin zarar görmesi gibi zincirleme olarak birçok konuda geleceğimizi tehdit etmektedir [11].

Avrupa Komisyonu'nun yayınladığı Entegre Kirliliğin Önlenmesi ve Kontrolü Direktifi'nde "Topluluğun çevre politikasının hedef ve ilkeleri, özellikle kirliliğin önlenmesi ve azaltılmasını ve mümkün olduğu ölçüde, "kirliten öder" ve kirliliğin önlenmesi ilkesi ile uyumlu olarak, kaynağında girişimde bulunmaya öncelik vermek ve kaynakların akılcı yöntemini sağlamak suretiyle kirliliğin giderilmesi" denilmekte ve kirliliği kaynaktan kontrol etmeye, atıkların azaltılmasına ve geri dönüştürülmesine zorlamaktadır [12].

Türkiyede AB ile uyum çerçevesinde kirliliğin önlenmesi ve atıkların geri dönüştürülmesi yaklaşımı gelişmektedir. Bu yaklaşım ilgili kurumları ve asfalt üretim tesislerini, atıkları geri dönüştürmeye ve çevre kirliliğini azaltmaya zorlayacak, bu konuda gerekli geri kazanım teknolojilerine sahip olmaya teşvik edecektir [2].

Dünyada birçok ülke asfaltın geri dönüşümünü teşvik etmekte ve bu konuda yasal düzenlemeler getirmektedir. İngiltere agrega kullanımı ve atık depolamasına vergi almaktadır. İsveç' te şartnamede belirtilen orandan daha yüksek miktarda RAP (Yeniden Kullanılan Asfalt Kaplama) kullanılması durumunda farklı teşvikler verilirken, Hollanda'da geri dönüşümü mümkün olabilen malzemelerin atılması yasaklanmıştır [13].

Üzerinde yaşadığımız doğa tüm toplumların ortak yararlandığı bir yaşam alanıdır ve doğayı koruyarak gelecek nesillere temiz bir şekilde aktarmak tüm insanların ortak görevidir [11].

1.4 Asfaltta Geri Dönüşümün Faydaları

Kazınmış asfalt kaplamaların geri dönüşüm yöntemleri ile tekrar kullanımının sağlanmasının faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz: [14].

- Atık malzemenin yeniden kullanılarak milli kaynakların korunması ve ekonomik fayda elde edilmesi
- Yeni malzeme ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların korunması

- Atık sahaları ihtiyacını azaltarak çevrenin korunması
- Onarım işlerinde mevcut kaplama üzerinde yeni bir kaplama yapılmadığı için kot yükselmesi ve yeni yapılacak tabakadaki yansıma çatlakları oluşumu gibi sorunların yaşanmaması
- Tabaka eklenmesi suretiyle yapılan onarımlara göre geri dönüştürülerek yenilenen yolun daha mukavemetli olması
- Enerji tasarrufu sağlaması.

1.5 Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Mazlum (2014), çalışmasında yeni bitümlü sıcak karışıma %10, %25 ve %40 oranlarında RAP malzemesi ekleyerek asfalt kaplamaların geri dönüşüm oranlarını incelemiş ve sonuç olarak asfalt kaplamaların geri dönüşümü ile yeni asfalt üretim maliyetlerinin azaldığı, mevcut kaplamaların üzerine yeni kaplama yapılmadığı için yansıma çatlaklarının önlendiği, çevreye verilen zararın azaldığı ve atık sahalarının oluşmasının engellendiğini belirtmiştir.

Salta (2010) çalışmasında, asfalt kaplamaların geri dönüşümü ile yeni asfalt kaplama maliyetlerinin düştüğü, yeni asfalt üretimi sonucu çevreye verilen zararın azaltıldığı, doğal kaynakların tüketiminin azaltıldığı ve enerji tasarrufu sağlandığı sonucuna varmıştır.

Arapoğlu (2015), bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşüm maliyetleri üzerine yaptığı çalışmasında, %10, %20, %30, %40 ve %50 RAP içeren karışımların maliyetini incelemiş ve karışımlarda RAP oranı arttıkça ekonomik kazancın da aynı şekilde arttığı sonucuna varmıştır.

Yavuz (2018), asfalt üretim tesislerinde plent atığı malzemeleri bitümlü sıcak karışımlarda % 0, % 25, % 30, % 40 ve % 50 oranlarında karıştırarak karışımların performansını ölçtüğü çalışmasında, atık malzemelerin geri dönüşümü ile çevresel ve ekonomik fayda sağladığı sonucuna ulaştığını belirtmiştir.

1.6 Çalışmanın Amacı

Dünya nüfusu ve gelişmişlik düzeyine bağlı olarak hızla artan tüketim sebebiyle atık miktarı sürekli olarak artmaktadır. Bu atıkların çevre kirliliğine dönüşmemesi, doğal

kaynakları tüketmemesi, doğaya zarar vermemesi ve ekonomiye tekrar kazandırılması amacıyla geri dönüştürülmesi ülkemiz ve dünyamız için son derece önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, bakım, onarım, tamirat, yenileme veya hatalı imalat gibi nedenlerle yollardan sökülen asfalt betonu malzemesinin, uygun geri dönüşüm yöntemleriyle geri dönüştürülerek binder tabakasında yeniden kullanılabilirliğini araştırmaktır.

1.7 Çalışmada İzlenen Yol

Bu çalışmada, literatürlerin derlenmesi, geri dönüştürülecek asfalt malzemesinin temini, boyutlarının düşürülmesi, RAP malzemesinin binder tabakası olarak tasarlanan yeni karışıma toplam agreg ağırlığının %15, %30 ve % 45 oranlarında eklenmesi, bu oranlarda hazırlanan karışımların ve RAP katkısız olarak hazırlanan karışımın performans deneylerinin yapılması, karışımların maliyet analizlerinin karşılaştırılması ile sonuç ve öneriler çalışmaları yer almaktadır.

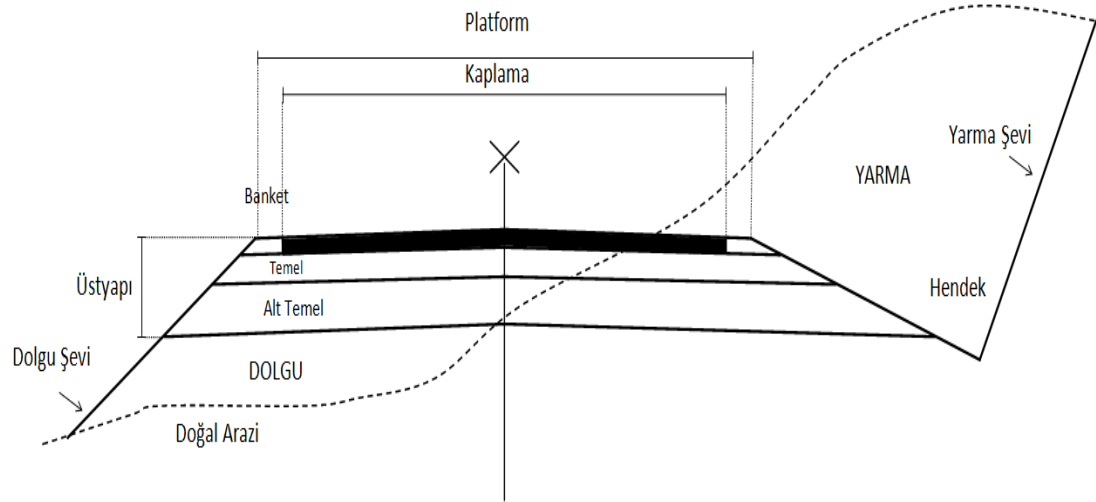


2. GENEL BİLGİLER

2.1 Karayolu Yapısının Tanımı ve Üstyapı Tipleri

Karayolu, belirlenmiş geometrik standartlara göre saptanan güzergah boyunca, tabii zeminin istenilen yükseklikte ve motorlu taşıtların belirlenen hız konfor ve güvenlik koşullarında hareket edebilmesi amacıyla oluşturulan yapılar olarak tanımlanabilmektedir [15].

Şekil 2.1’de tipik bir karayolu enkesiti görülmektedir.



Şekil 2.1 : Karayolu üstyapısı [16].

2.2 Esnek Üstyapılar

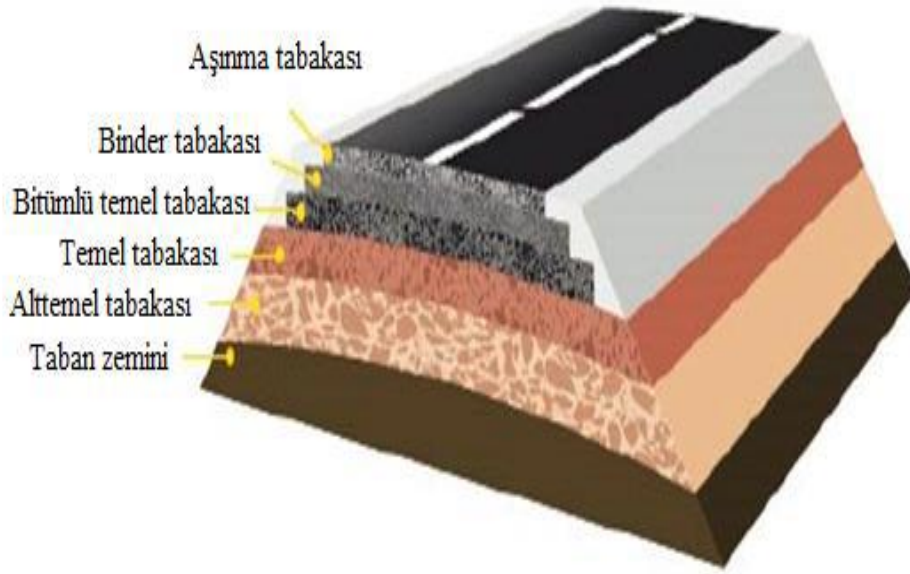
Esnek üstyapıda kullanılan kaplama tabakaları bitüm kullanılarak oluşturulur. Esnek üstyapılar sırasıyla kaplama tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakasından oluşmakta ve bu tabakalar vasıtasıyla trafik yüklerini zemine iletmektedir [17].

Kaplama tabakası üstyapının trafik yükleri ile temas eden en üst tabakasıdır. Trafik yüklerine doğrudan maruz kalır ve en büyük çekme-basınç gerilmeleri bu kısımda oluşur. Bu sebeple diğer tabakalara nazaran daha elastik ve daha stabil olması gerekir.

Kaplama tabakası ne kadar kalın olursa yolun direnci o kadar artar. Tabana iletilen kayma ve basınç gerilmeleri azalır. Suya karşı geçirimsiz bir yüzey oluşturarak temel

tabakalarını korur. Toz ve çamur oluşumunu da engelleyerek yol yüzeyi düzgünlüğünü ve sürüş konforunu sağlar.

Şekil 2.2’de tipik bir esnek üstyapı kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Esnek üstyapı görünüşü [17].

Kaplama tabakaları, sathi kaplamalar ve asfalt betonu kaplamalar olmak üzere iki şekilde imal edilirler [18].

2.2.1 Asfalt betonu (Beton asfalt) kaplamalar

Asfalt betonu kaplamalar, granülometrisi iyi ayarlanmış agregalar (iri agrega, ince agrega, filler) ve asfalt çimentosunun (bitüm) belirli oranlarda, belirli sıcaklık ve nem değerlerinde karıştırılması ile elde edilen karışımlardır. Bu kaplamalar ağır trafik yüküne sahip yollarda, havaalanlarında ve otoyollar gibi alanlarda uygulanır.

Asfalt betonu kaplamalar, yol yüzeyinde tabana doğru sıra ile aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakası olarak imal edilirler.

2.2.1.1 Aşınma tabakası

Aşınma tabakası asfalt betonu kaplamaların en üst katmanını oluşturur ve trafik yükleri doğrudan bu tabakaya etkir. Yol yüzeyini oluşturduğundan dolayı aşınma tabakasının;

- Güvenli bir sürtünme yüzeyi sağlaması, yüzey düzgünlüğüne sahip olması

- Suya karşı geçirimsiz bir yüzey oluşturarak altyapıyı koruması ve drenajı sağlaması
- Tekerlek izi gibi trafik etkilerine karşı stabil olması
- İstenen gürültü seviyesini sağlaması

gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple diğer tabakadaki malzemelere nazaran daha kaliteli malzemelerden üretilirler ve maliyetleri fazladır [17].

2.2.1.2 Binder tabakası

Binder tabakası, aşınma tabakası ile temel tabakası arasına serilir ve aşınma tabakasından gelen yükleri temel tabakasına iletir. Tekrarlı yükler sonucu oluşan çatlama ve deformasyonları karşı direnç göstererek kaplamayı daha stabil hale getirir. Ayrıca aşınma tabakası serilmesi için gereken düzgün yüzeyi oluşturur.

Trafik yükünün az olduğu yerlerde binder tabakası uygulanmasına gerek olmayabilir [17].

2.2.1.3 Temel tabakası

Esnek üstyapılarda temel tabakası kaplama tabakasının altında bulunarak trafik yüklerinden oluşan kayma gerilmelerine karşı koyar ve üstyapının yük taşıma kapasitesini artırır. Ayrıca drenaj ve don etkisine karşı da koruma sağlar. Temel tabakası uygun granülometriye sahip mekanik stabilizasyonlu temel, plentmiks temel, bitümlü temel ve çimento stabilizasyonlu temel olarak farklı şekillerde esnek üstyapılarda yerini alabilirler [18].

2.2.1.4 Alttemel tabakası

Esnek üstyapıların en alt tabakasını alttemel tabakası oluşturur. Tabanda oluşacak don etkisinin üstyapıya ulaşmasını ve tabanın taşıma gücünü aşabilecek yükleri önleyebilecek yapıda olmalıdır.

Alttemel malzemesi düşük taşıma gücü ve elastisite modulüne sahip olsa da iyi drene olma özelliğine sahip granüler malzemeden oluşur. Yol inşaatlarında yakın çevreden kaliteli seçme malzeme çıkarılarak getirilmesi ekonomi açısından uygun olmaktadır [18].

2.2.2 Yüzeysel (Sathi) kaplamalar

Sathi kaplama yapım yöntemi, bağlayıcı ve agreganın ardarda serilmesi ve sıkıştırılması şeklinde uygulanan bir yöntemdir. Önce asfalt distribütörü asfalt emülsiyonunu yüzeye püskürtür ve ardından bir kat agregaya serilerek sıkıştırılır. Bu işlemin tek ya da birkaç kez tekrarlanmasına göre sathi kaplamalar tek katlı sathi kaplama ve çok katlı sathi kaplamalar olarak yapılabilir.

Tek katlı sathi kaplamada kaplama kalınlığı serilen agreganın kalınlığı kadardır. Yüzey geçirimsizliği ve aşınma yüzeyi elde etmek için kullanılabilir.

Çok katlı sathi kaplama yapılırken, tek katlı sathi kaplamada yapılan işlem tekrarlanır. Yani bağlayıcı ve ardından agregaya seriminden sonra tekrar bağlayıcı ve agregaya serimi yapılır. Tek katlı sathi kaplamaya göre doğal olarak daha yüksek dayanıma ve geçirimsizliğe sahiptir [13].

Sathi kaplamalar asfalt betonu kaplamalara nazaran trafik yükünün daha düşük olduğu yollarda kullanılmaktadır. Sathi kaplamaların kullanılmasıyla;

- İyi bir kayma direncine sahip yol yüzeyi oluşturulabilir ve sürüş konforu sağlanabilir.
- Yüzey geçirimsizliği sağlayarak temel tabakasını korunması sağlanabilir.
- Trafik yükünü temel tabakalarına yayarak temel tabakasının bozulması önlenir.

Ancak bunların yanında asfalt betonu kaplamalara göre aşağıdaki olumsuz yönleri bulunmaktadır:

- Düşük taşıma gücüne sahip olduğu için ağır trafik yüküne sahip yollarda kullanılamaz.
- Sık sık yenileme, bakım ve onarım gerektirir.
- Yüzeyden zamanla kopan sebest agregalar trafik güvenliğini tehlikeye atabilir.
- Sürtünme direnci yüksek olduğundan dolayı bu yolu kullanan araçların işletme maliyetleri yükselir.
- Sürüş konforu düşük ve tekerlek gürültüsü yüksektir.

Sathi kaplama serme ve sıkıştırma uygulaması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Sathi kaplama serme ve sıkıştırma uygulaması.

2.3 Esnek Üstyapılara Etkiyen Kuvvetler

Yol üstünden tabana doğru kaplama tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakasından oluşan esnek üstyapılarda, tabana doğru inildikçe tabakalarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve kaliteleri düşer. Farklı mekanik özelliklere sahip bu malzemeler yük taşıma ve yükü dağıtma yönünden de farklı davranışlar gösterecektir.

Karayollarında oluşan gerilmeleri,

- Trafik yüklerinden oluşan mekanik gerilmeler.
- Sıcaklık ve nemin (iklim koşullarının) değişiminden oluşan fiziki gerilmeler.

olarak iki grup altında incelenebilir [19].

2.3.1 Trafik yüklerinden oluşan mekanik gerilmeler

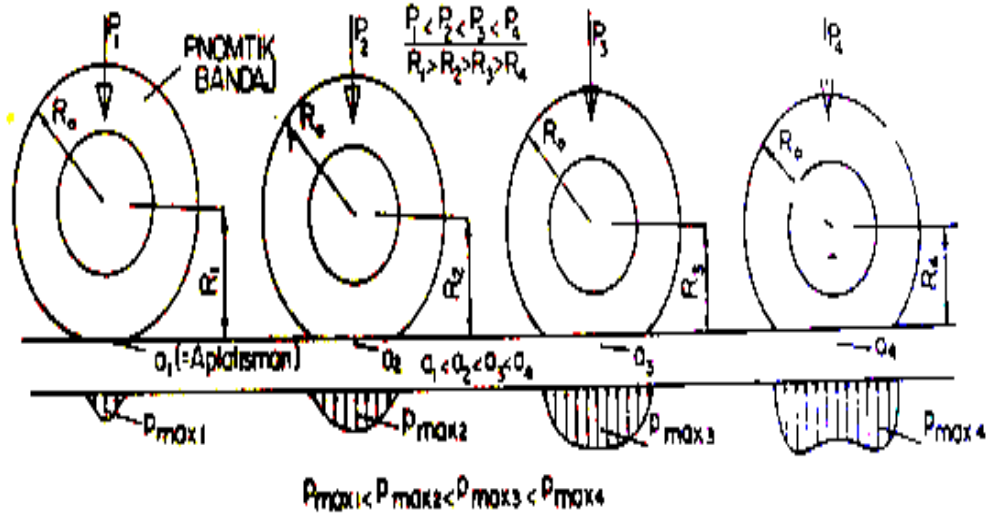
2.3.1.1 Düşey yükler

Karayollarında taşıtların ağırlıkları her bir dingile bölünür ve tekerlek bandajları vasıtasıyla kaplama yüzeyine aktarılır. Üstyapıya etkiyen trafik yüklerinin hesaplanması ve ekonomik olmayan kalınlıkların ortaya çıkmaması için, ayrıca yol bozulmalarına sebep olacak aşırı dingil yüklerinin önlenmesi için dingil yükleri ve dingiller arası mesafeler sınırlandırılmıştır.

Tekerlek bandajından yol yüzeyine etkiyen düşey yükler ve kayma kuvvetleri sonucunda yol tabakalarında çekme, basınç, eğilme ve kayma gerilmeleri oluşur. Dingil yükü, tekerlek şişirme basıncı, teker lastiği üzerindeki yiv ve setler ve araç hızı gibi faktörler bu gerilmelerin şiddetini belirleyen faktörlerdir.

Yapılan bazı araştırmalar ve gözlemlere göre, hızı fazla olan araçlar az olan araçlara göre yol yüzeyine daha düşük gerilme uygulamaktadır.

Yol yüzeyine etkiyen yükler, bandajın değme alanı üzerinde kaplamaya aktarılırlar. Bu değme alanı tekerlek üzerindeki tekil yükün büyüklüğüne bağlı olarak, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi farklı şekiller almaktadır [19].

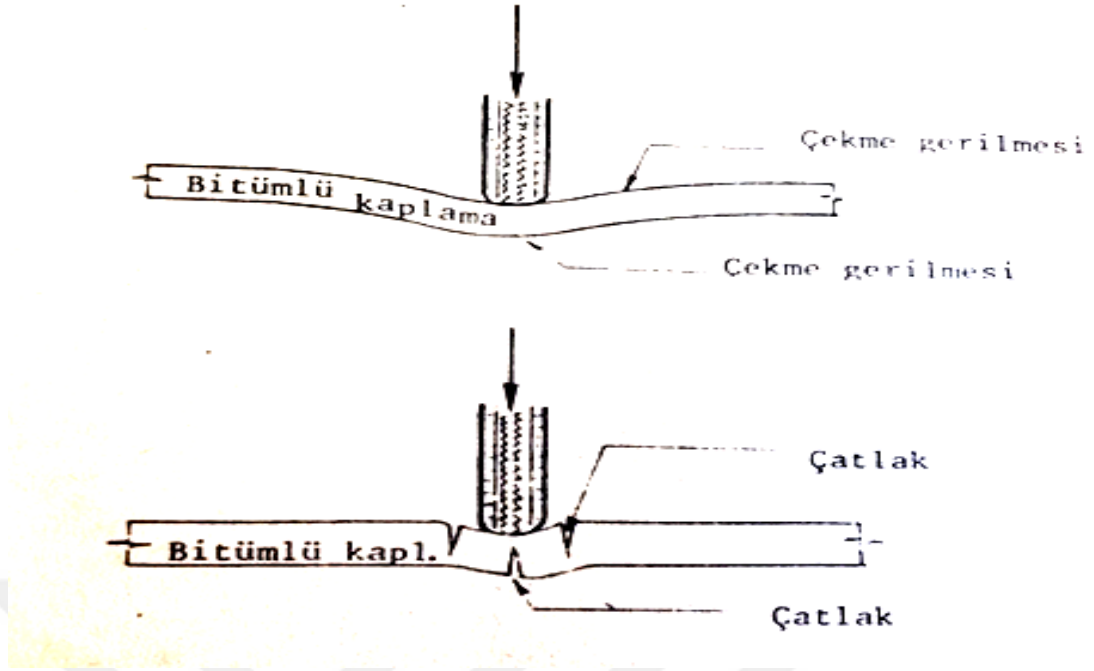


Şekil 2.4 : Tekerlek yüklerine göre değme alanları ve gerilme dağılışı [19].

Üstyapının bozulmasına kaplama tabakası ile temel tabakası arasında oluşan çekme gerilmeleri veya temel tabakasında oluşan basınç gerilmeleri sebep olur. Üstyapı projelendirilirken her tabaka için gerilme değerlerinin, kritik gerilme değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir.

Çekme gerilmeleri fazla ise kaplama tabakasının temel ile birleştiği alt kısmında çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar zamanla yukarı doğru ilerler. Temel tabakasında aşırı basınç gerilmeleri oturmaya sebep olarak kaplama tabakasında büyük çekme gerilmeleri oluşturur [19].

Şekil 2.5'te trafik yükleri altında kaplama tabakasında oluşan çekme ve basınç gerilmeleri sonucu oluşan bozulmalar görülmektedir.



Şekil 2.5 : Kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altında bozuluşu.

Üstyapı üzerinde tekerleğin hareketi sırasında yol yüzeyinin düzgün olmamasından dolayı veya bir çıkıntı-engel bulunmasından dolayı, tekerleğin çarpması sonucu kaplamaya uygulanan kuvvet çok daha artmaktadır [20].

2.3.1.2 Uzunluğuna teğetsel kuvvetler

Bu kuvvetler, harekete geçiren tekerlekler ve harekete geçirmeyen tekerlekler olmak üzere iki tür tekerlek hareketinden kaynaklanabilir.

- Harekete geçiren tekerleklerin etkisi: Bu tekerleklerin hareketi ile oluşan kuvvetler kaplama üzerinden malzeme koparıp atmaya çalışırlar.
- Harekete geçirmeyen tekerleklerin etkisi: Bu tekerleklerin hareketiyle oluşan kuvvetler, esnek kaplamalarda yol üstündeki asfaltı ileri ve aşağı doğru sürerken, önünde çıkıntı meydana getirir ve bu etki bitene kadar ilerler. Bu olayın sürekli tekrarlanması sonucu yolda dalgalanmalar meydana gelir.

Bu tür kuvvetler frenleme sırasında da oluşur ve malzemeyi kaplamadan koparıp ileri doğru atmaya çalışan kuvvetlerdir [20].

2.3.1.3 Enine teğetsel kuvvetler

Bu kuvvetler araca etki eden merkezkaç kuvvetinden, rüzgar kuvvetinden veya tekerleklerin kaplama üzerinde yana doğru hareketlerinden kaynaklanır.

2.3.1.4 Emme kuvvetleri

Aracın kaplama üzerinde hareketi sırasında tekerlerin arkasında havanın emilmesiyle oluşan hava boşluğundan ve hızlı araçların havayı sürüklemelerinden kaynaklanan kuvvetlerdir. Asfalt kaplamasız yollarda araç hareketi sırasında toz bulutlarının ortaya çıkması bu kuvvetlerin varlığındandır [20].

Teğetsel kuvvetler ve emme kuvvetleri kaplamanın yalnızca üst kısmında bozulmalara yol açar ve alt tabakalara tesir etmezler.

2.3.2 Sıcaklık ve nemin (İklimin) değişmesinden doğan gerilmeler

Sıcaklığın düşmesi bitümlü kaplamanın büzülmesine sebep olabilirken, temel tabakası bu büzülme hareketine karşı koyduğunda kaplama tabakasında çekme gerilmeleri oluşur. Bunun yanında, agreganın hacimsel genleşme katsayısı $3,5 \times 10^{-5}$ ve asfaltın hacimsel genleşme katsayısı 6×10^{-4} olduğundan dolayı, sıcaklığın düşmesi farklı genleşen iki malzemenin farklı genleşmesine sebep olacaktır.

Farklı genleşen agregalar arasındaki asfalt filminde çekme gerilmeleri oluşarak asfaltın agregadan kopmasına ve yolda oyuklar oluşmasına neden olacaktır.

Esnek üstyapılarda termal gerilmeler mekanik gerilmelerle birleştiklerinde kaplama ve temel tabakaları için ciddi risk teşkil etmektedirler [19].

2.4 Esnek Üstyapı İmalatında Kullanılan Malzemeler

2.4.1 Agregalar

Yol inşaatının ana malzemesi agregalardır. Trafik yüklerinden oluşan gerilmeleri karşılamakta büyük paya sahiptir. Farklı agrega türlerinin karakteristik teknik özellikleri, üstyapıyı projelendiren mühendis için çok önemlidir [6].

Agregalar üstyapının stabilitesini sağlamasının yanında, miktar olarak bağlayıcı kullanılmayan alttemel ve temel tabakalarının tamamını, bitümlü sıcak kaplamaların ağırlıkça %90-95'ini, beton yolların ağırlıkça %70-80'lik kısmını oluşturur. Üstyapının stabilitesine olan büyük etkisi ve büyük miktarda kullanımından dolayı agrega yol inşaatları için çok önemli bir yapı malzemesidir [18].

Şekil 2.6'da farklı boyut ve şekildeki agregalar görülmektedir.



Şekil 2.6 : Farklı boyut ve şekilde agregalar.

Agregalar boyutlarına, granülometrilere ve özgül ağırlıklarına göre sınıflandırılabilirler.

2.4.1.1 Boyut sınıflandırması

Agregalar aşağıda belirtilen boyutlara göre sınıflandırılır:

- Kaba Agregat: no:4 (4,76 mm) eleğin üzerinde kalan kısım
- İnce Agregat: No:4 elekten geçen ve No:200 elek (0,075 mm) üzerinde kalan kısım
- Filler : No:200 elekten geçen kısım (en az %65'i No:200 elekten geçen mineral taş tozu veya taş unu) [18].

Kaba agregat, ince agregat ve fillerin herbiri bitümlü sıcak kaplamaların farklı özelliklerini belirler. Kaba agregat %40-50 civarında kullanıldığında karışım için mekanik direnci arttıran bir iskelet oluşturur ve karışımın stabilitesinde artış olur.

İnce agregat, kaba agregadan oluşan bu iskeletin boşluklarını doldurur ve daha yoğun bir karışım oluşmasını sağlar. Mineral filler malzemesi karışımın küçük bir yüzdesini oluştursa da karışımın fiziksel özellikleri üzerinde etkisi büyüktür. Ancak bu malzemenin seçiminde dikkat edilmesi gerekir. 0,074 mm den daha ince olan bütün malzemeler filler değildir. Fillerin bitüm ile reaksiyona girmeyecek malzemeden oluşması gerekir. Filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu, sönmüş kireç gibi

malzemelerden oluşabilir ancak kil, toprak, organik ve zararlı malzemeler fillerde bulunmamalıdır [6].

2.4.1.2 Granülometri sınıflandırması

Granülometri, agregayı oluşturan danelerin boyularına göre karışımdaki miktarını ifade eder. Karışımın stabilitesi ve işlenebilirliğini agrega granülometrisi belirler. Genel olarak maksimum boyut 25,4 mm den büyük ise işlenebilirlik zorlaşırken stabilite ve yoğunluk artar [18].

Şartnameler karışımdaki farklı boyuttaki agregaların ağırlıkça miktarını ve agregaların maksimum dane boyutunu belirlemiştir. Maksimum dane boyutunun artması işlenebilirliği, sıkışmayı, boşluk miktarını azaltır, yoğunluk ve stabiliteyi artırır.

Agregalar granülometri yönünden aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

- Kesikli granülometri
- Yoğun-sürekli granülometri
- Boşluklu sürekli granülometri
- Tek boyutlu granülometri

Yoğun-sürekli granülometri:

Yoğun sürekli gradasyonda en iri agrega ve en ince agrega arasındaki farklı boyutlardaki agregalar birbirlerinin boşluklarını doldurabilecek oranlarda kullanıldığı için boşluk miktarı en az, yoğunluk en fazla olmaktadır.

Bu granülometrinin elek analizi grafiği sürekli bir eğri şeklindedir [18].

Boşluklu-sürekli granülometri:

Bu gradasyon tipinde ince agrega bulunmaz bu yüzden karışımın boşluk oranı fazladır. Dona duyarsız tabakalarda drenaj ve filtre amaçlı kullanılabilirler. Standardı düşük yollarda temel tabakası olarak kullanılabilir.

Alttemel ve granüler temel tabakalarının iyi dren olabilmeleri için granülometrinin alt kısmı boşluklu olmalı, No:100 ve No:200 eleklerinden geçen ince malzeme çok az olmalı veya hiç olmamalıdır.

Kesikli granülometri:

Kesikli granülometride belli aralıklardaki dane ϕ apına sahip agregalar bulunmaz. Bu sebeple boşluk oranları fazladır. Genel olarak yol yapımında kullanılmaz ancak belirli limitler dahilinde beton imalatında kullanılabilir.

Tek boyutlu (uniform) granülometri:

Bu tip granülometride karışımı oluşturan agregaların boyutları hemen hemen aynıdır. Sathi kaplama gibi standardı düşük olan yollarda kullanılabilir.

2.4.1.3 Özgöl ağırlık sınıflandırması

Karışım hesapları için agregaların özgöl ağırlıklarının bilinmesi gerekir. Agregalar zahiri (görünür) özgöl ağırlık, hacim özgöl ağırlığı (kuru özgöl ağırlık) ve doygun-kuru yüzey özgöl ağırlık olmak üzere üç tip özgöl ağırlığa sahiptir [18].

Zahiri (görünür) özgöl ağırlık (SGz): Belli sıcaklık ve birim hacimdeki agreganın havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıktaki suyun havadaki ağırlığına oranıdır.

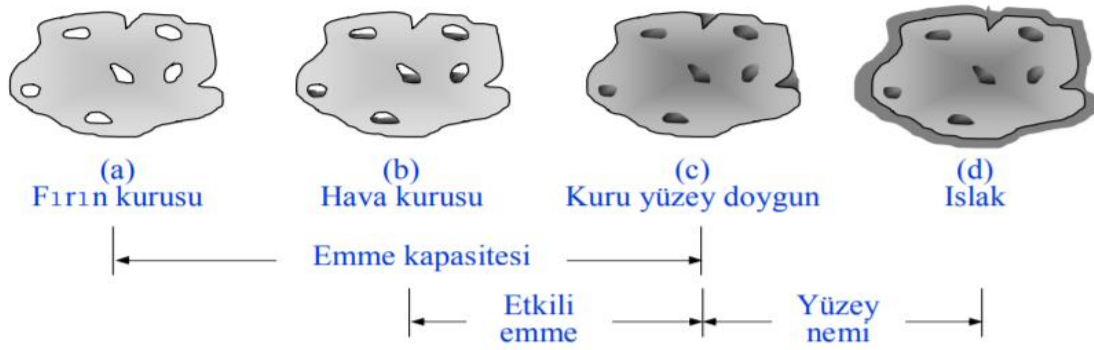
Hacim özgöl ağırlığı (SGh) veya kuru özgöl ağırlık: Sadece daneler arasındaki değil daneler içindeki tüm boşlukları kapsayarak, belli bir sıcaklık ve birim hacimdeki agreganın havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış saf suyun havadaki ağırlığına oranıdır.

Doygun-kuru yüzey özgöl ağırlık (SGdky): Agreganın yaklaşık 15 saat suda bekletilip daneler içindeki boşluklar tamamen suyla dolduktan sonra belli sıcaklıkta ve birim hacimde ki agreganın havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve havası alınmış saf suyun havadaki ağırlığına oranıdır.

Agrega daneleri su absorbe edebilen boşluklar(havayla temas edebilen boşluklar) ile su absorbe edemeyen boşluklar (havayla temas edemeyen katı hacmin içindeki boşluklar) içermektedir.

Su absorbe edebilen boşluklar suyla dolu değilse (veya hava ile dolu olduklarında) sıfır ağırlığa sahip iken suyla dolu olduklarında ise suyun ağırlığına sahiptirler.

Şekil 2.7’de agreganın boşluklarının su ile dolu olduğu farklı durumlar gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Agregalar boşluklarının su ile dolu olduğu farklı durumlar [21].

- a) Fırın kuru: Agregaların 100-110 °C etüvde kurutularak agregalar bünyesinde hiç suyun kalmadığı durumdur
- b) Hava kuru taneler: Agregaların yüzeylerinin kuru olduğu fakat suyun iç boşluklarında bir miktar bulunduğu durumdur
- c) Kuru yüzey doygun: Agregaların yüzeylerinin kuru ve içindeki boşlukların tamamen su ile dolu olduğu durumdur.
- d) Islak doygun: agregalar yüzeylerinin ve iç boşluklarının tamamen su ile dolu olduğu durumdur.

Agregalara ait özgül ağırlıklar;

A: Numunenin etüvde kurutulmuş ağırlığı

B: Numunenin kuru yüzey doygun haldeki ağırlığı

C: Numunenin sudaki ağırlığı

olmak üzere, bu değerler bulunduktan sonra aşağıdaki formüllerle hesaplanır: [18]

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık(SGz)}=A/(A-C) \quad (2.1)$$

$$\text{Hacim özgül ağırlığı (SGh)}=A/(B-C) \quad (2.2)$$

$$\text{Doygun-kuru yüzey özgül ağırlık(SGdky)}=B/(B-C) \quad (2.3)$$

2.4.2 Bitümlü bağlayıcılar

Bitümler, doğal kökenli hidrokarbonlar veya ısıtımın etkisiyle oluşan ergime sonucu oluşan hidrokarbonlar veya bu iki tip hidrokarbonun kombinasyonu olarak oluşan

maddelerdir. Katı, sıvı, gaz ve yarı katı halde olabilirler. Bitümlerin yapıştırıcı özellikleri bulunur ve karbondisülfürde (CS₂) tamamen çözülebilirler [1].

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak “Katranlar” ve “Asfaltlar” olmak üzere iki kısma ayrılır.

2.4.2.1 Katranlar

Odun veya kömürün damıtılması sonucu ham katran olarak elde edilen katranlar, arıtıldıktan sonra yol inşaatlarında kullanılmaktadır. Yol kaplamalarında katranın genellikle kömür kökenli olması tercih edilmektedir [6].

2.4.2.2 Asfaltlar

Asfaltlar hidrokarbonlardan oluşan, kuvvetli bağlayıcı özelliğine sahip, katı, sıvı ya da yarı katı kıvamda olabilen, siyah ve kahverengi renkleri arasında bulunan maddelerdir. Ham petrolün damıtılmasından veya doğal kaynaklardan elde edilmekte olup, doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olarak iki gruba ayrılırlar [6].

Doğal asfaltlar genellikle mineral maddelerle karışmış halde doğada bulunurlar. Göl asfaltı veya kaya asfaltı olarak bulundukları yere göre isimlendirilirler. Dünyada göl asfaltlarının en yaygını Güney Amerika’da bulunan Trinidad göl asfaltıdır. Yaklaşık 10-15 milyon tonluk rezervi sahiptir ve rafine edildikten sonra %55 civarında asfalt içerir. Kaya asfaltları kalker, kumtaşı gibi mineraller ile birlikte en fazla %12 civarında bitüm içerirler. Doğal asfaltlar asfalt çimentosuna katılarak modifiye bitüm veya agregaya ilave edilerek modifiye karışım hazırlama bitümlü karışımlara katılarak modifiye karışım elde etmekte kullanılırlar. Doğal asfalt bulunan karışımların plastik deformasyonlara karşı dayanımı ve agrega bitüm adezyonu artmaktadır. Mastik asfalt, poroz asfalt ve asfalt betonu gibi karışımlarda kullanılmaktadırlar [22].

Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılması sonucu elde edilirler. Yol inşaatlarında kullanılan yapay asfaltlar, asfalt çimentoları (bitümler) ve sıvı asfaltlar olarak iki kısımda incelenebilir.

Asfalt çimentoları (AC):

Asfalt çimentoları yol inşaatlarında esnek kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılır. Ham petrolün damıtılması yoluyla veya doğal asfalttan elde edilebilirler. Esnek kaplamalarda 40-300 penetrasyon aralığında asfalt çimentoları kullanılmaktadır [18].

Yol imalatlarında kullanılan asfalt malzemesi, yalıtım ve diğer endüstriyel uygulamalar gibi farklı alanlarda kullanılan asfalttan ayırt edilmesi amacıyla asfalt çimentosu olarak adlandırılmaktadır [23].

Sıvı asfaltlar:

Sıvı asfaltlar, asfalt çimentosu ile uygun katkıları kullanılmasıyla sıvılaştırılmış ve püskürtme (sprey) yöntemiyle yol inşaatlarının astar ve yapıştırma tabakalarında kullanılan bir asfalt türüdür. Katbek asfaltlar ve asfalt emülsiyonları olarak iki grupta incelenebilmektedir [24].

Katbek asfaltlar: Katı asfaltların yüksek ısı ileme tabii tutulup sıvı hale getirilmesi yerine, kaynama noktası düşük ve uçucu özellikteki benzin, madeni yağ ve gaz yağı gibi çözücülerin katılarak elde edilen sıvı asfaltlardır. Kür süresine göre hızlı kür olan RC sınıfı, orta hızda kür olan MC sınıfı ve yavaş kür olan SC sınıfı olarak üç çeşit katbek asfalt tipi vardır [24].

Asfalt emülsiyonları: Emülsiyon genel olarak, birbiri içerisinde çözünmeyen sıvılardan birinin diğeri içinde homojen olarak kürecikler şeklinde dağılmasıyla oluşan sıvıdır. Asfalt emülsiyonları da aynı şekilde asfalt çimentosu küreciklerinin su içinde dağılmasıyla olur. Asfalt küreciklerinin birbirlerine yapışarak sudan ayrılmasını önlemek amacıyla emülgatör kullanılmaktadır.

Asfalt emülsiyonu yola püskürtüldükten sonra içeriğindeki su buharlaşır ve asfalt çimentosu kürecikleri agregaya yapışır, yani emülsiyon kesilir. Kesilme hızlarına göre asfalt emülsiyonları çabuk kesilen RS asfalt emülsiyonları, orta hızda kesilen MS asfalt emülsiyonları ve yavaş kesilen SS asfalt emülsiyonları olarak üç tipte kullanılır.

Asfalt emülsiyonları genel olarak sathi kaplamalarda, yama ve onarım işlerinde, makadam yol kaplamalarında ve harç kaplamalarda kullanılmaktadır [6].

2.5 Bitümlü Sıcak Kaplamaların Üretimi

Bitümlü sıcak karışımların üretimi asfalt plantlerinde gerçekleşir. Agregalar asfalt plantinde karıştırılır, ısıtılır ve kurutulduktan sonra sıcak bitüm ile karıştırılarak sıcak asfalt betonu elde edilir. Asfalt plantleri bu işlemleri yapabilmek için birçok elektronik ve mekanik bileşenden oluşan karmaşık bir yapıya sahip olup, kapasitelerine, üretim şekline, mobil veya sabit olmalarına göre değişik tipleri vardır [6].

Bitümlü sıcak kaplamaların üretimi asfalt plantlerinde gerçekleşir. Asfalt plantleri agregaları karıştırır, ısıtır, kurutur ve sıcak asfalt betonu elde etmek üzere bitümlü bağlayıcı ile karıştırır.

Asfalt planti kısaca sıcak bitüm ile değişik boyutlarda gruplandırılmış agreganın bir mikserde karıştırılarak serime hazır hale getirildiği tesistir.

Genel olarak iki tip asfalt planti vardır. Bunlar; [6]

- Harman Karışım (Batch mix)
- Kazan Karışım (Drum mix)

Her iki tip plantin de bitümlü sıcak karışım üretmek için sahip olması gereken temel işlevler vardır. Bunlar; [25]

- 1- Asfalt karışımını oluşturan malzemelerin depolanması
- 2- Agregaların ısıtılması ve kurutulması
- 3- Kurutma işlemi sonrasında ortaya çıkan tozun filter edilmesi
- 4- Kurutucuya doğru oranlarda ve sürekli agrega beslemesi yapılması
- 5- Isıtılmış agrega ile bitümün doğru oranlarda karıştırılabilmesi
- 6- Hazırlanan asfalt betonunun taşıtlara yüklenmesi
- 7- Asfaltta geri dönüşüm işleminin gerçekleştirilebilmesi

2.5.1 Batch – Mix tipi asfalt planti

Batch Type asfalt plantleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Şartnamelerinde Ağırlıklı Tip olarak, TS-EN 536 da Bir Dolumluk Tesis olarak adlandırılmaktadır.

İngilizcede “Batch Type” olarak adlandırılan ağırlıklı tip asfalt plantleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Şartnamelerinde “Ağırlıklı Tip” olarak, TS-EN 536’da ise “Bir Dolumluk Tesis” olarak isimlendirilmektedir. Bu plantlerde drum miks plantlerinden farklı olarak, kurutulan agrega sıcak agrega elevatörü ile eleklerle yönlendirilmekte ve elekler vasıtasıyla agregalar boyutlarına göre ayrılarak istenilen granülometri elde edilmektedir. Daha sonra hazırlanan bu agrega karışımı miksera yönlendirilerek bitüm ile karıştırılmaktadır. Üretim tek seferde mikser kapasitesi kadar olup, drum tip plantlerdeki gibi kesintisiz devam etmemektedir [26]. Şekil 2.8’de İsfalt Habibler Fabrikasında kullanılmakta olan Batch-mix tipi plantler görülmektedir.



Şekil 2.8 : Batch-mix tipi asfalt plantleri (İsfalt Habibler Fabrikası).

Asfalt üretiminde en doğru sonuç batch mix asfalt plantlerinden alınır. Yüksek standartlı yolların yapımıyla birlikte batch mix plantler daha çok tercih edilmiştir [6].

Batch – Mix tipi asfalt plantin özellikleri aşağıdaki gibidir [6].

- a) Karışımın standartı her karışım için kontrol edilebilir.
- b) Karışımında kullanılan agrega miktarı devir kontrolü ile belirlenmesinin yanında tartım yoluyla doğru oranda miksere verilmektedir.
- c) Karışımında kullanılacak bitüm miktarı devir kontrolü ile değil tartım yoluyla hassas olarak yapılmaktadır.
- d) Kullanılacak filler miktarı tam olarak verilebilmektedir.
- e) Katkı kullanımı için sistem mevcuttur.
- f) Bitümlü sıcak kaplamaların her çeşidini üretmek mümkündür.

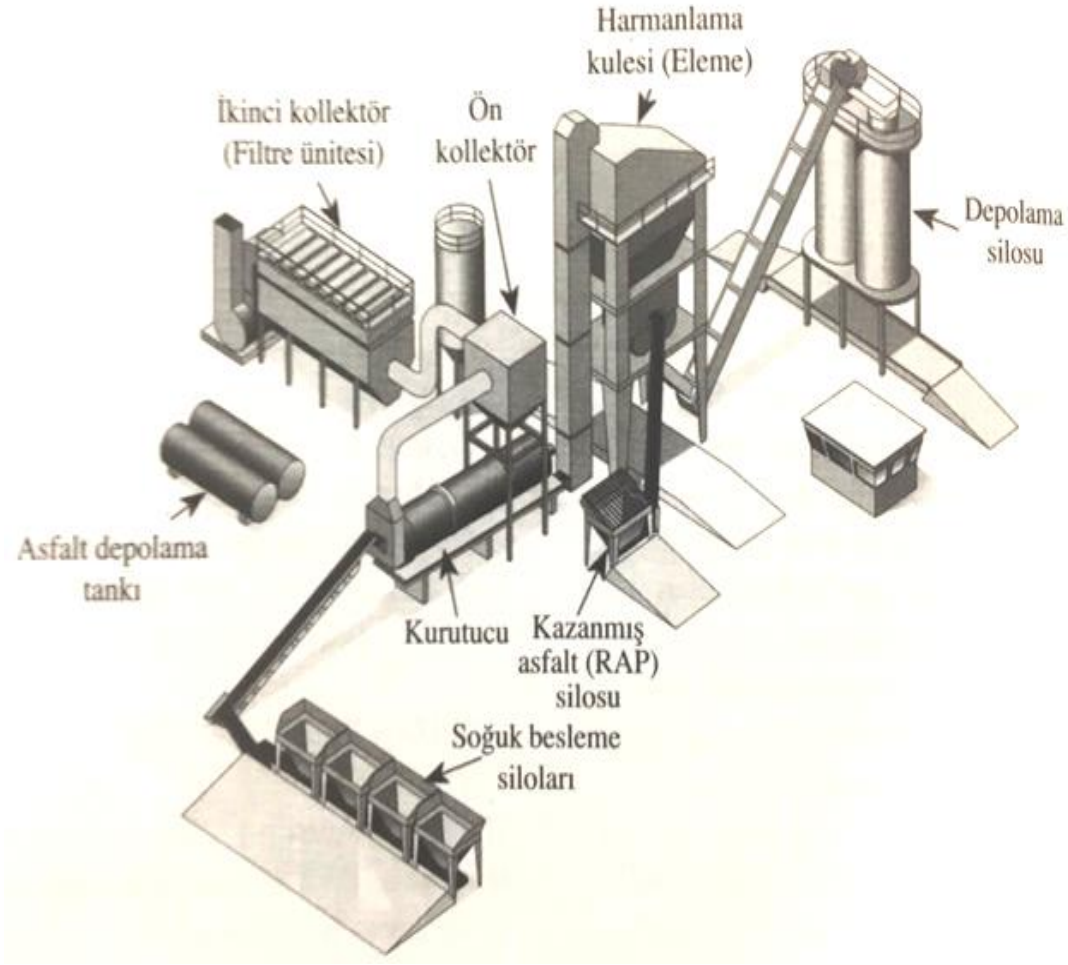
Batch tip plantlerde sırasıyla bulunan bölümler ve işlevleri şu şekildedir:

1. Soğuk Mal Siloları: Agregaların depodan alınarak plant bünyesine girdiği ilk kısımdır.
2. Bantlar: Soğuk mal silolarından kurutucuya agrega taşımaktadır.
3. Drayer: Agregayı ısıtıp kurutmakla görevlidir. Bunun için içinde püskürtülen alev ile beraber dönme hareketi yapar.
4. Elevatör: Kurutucudan (Drayer) çıkan agregayı kovalı zincirli sistemi ile üst ünitelere taşır.
5. Elek: Sıcak agreganın boyutlarına ayrıldığı bölümdür.
6. Sıcak Mal Silosu: Elekte elenen agreganın tartım için hazır bekletildiği kısımdır.
7. Tartım Ünitesi: Elekte boyutlarına ayrılan agreganın istenilen granülometride üretimi için tartıldığı bölümdür.
8. Sıcak Asfalt Tankı: Bitümün ısıtıldığı yerdir.
9. Asfalt Tankları: Fazla bitümün depolandığı, gerektiğinde sıcak asfalt tankına iletmek üzere bekletildiği ünitelerdir.
10. Bitüm Tartım Ünitesi: Isıtılan bitümden istenilen miktarda alarak pompalar ile mikse iletilen ünitelerdir.
11. Mikser: Tartılan agrega ve sıcak bitümün belirlenen sürelerde karıştırılarak son ürün olan asfalt haline getirildiği yerdir.
12. Kuru Siklon: Kurutucunun çalışması sırasında çıkan tozun tutularak karışımda tekrar filler olarak kullanımını sağlayan bölümdür [27].

Batch tip plantlerde üretimin ilk aşamaları aşağıdaki şekilde gerçekleşir;

- Kullanılacak olan agregalar depolardan alınarak soğuk besleme silosuna getirilir.
- Soğuk siloların altındaki kapak açıklığının boyutuna ve besleme bandının hızına bağlı olarak farklı boyutlarda alınacak agrega miktarları ayarlanır.
- Soğuk silolardan alınan malzemeler yükleme bandı vasıtasıyla agrega kurutucusuna (drayer) gönderilir [28].

Şekil 2.9’da batch-mix tipi bir plantin ana bölümleri görülmektedir.



Şekil 2.9 : Batch Tipi Plantin Ana Bölümleri [28].

Bu tip plantlerde kurutucular ters akım sistemine sahiptir. Kurutucunun üst bölümünden agrega girişi olur ve hem tamburun dönüş hareketi hem de tamburun iç cidarlarındaki kanat şekli sebebiyle agregalar aşağı doğru hareket eder.

Brülör tamburun alt ucunda konumlandırılmış olup üstten gelen agreganın geliş yönüne ters yönde alev püskürtmektedir. Bu sırada çıkan egzoz gazları ve rutubet agrega akışına ters yönde kurutucunun üst ucundan dışarı atılır.

Sıcak ve kuru agrega tamburun alt ucundan boşalarak elevatör ile karışım kulesinin tepesine taşınır. Elevatörden gelen malzeme titreşimli eleklerden geçerek sıcak silolara boşalır. sıcak silolarda boyutlarına göre ayrılan agregalar tartım haznesinde tartılarak doğru miktarlarda karışıma verilir.

Agregaların tartımıyla eş zamanlı olarak bitüm depolama tankından kulenin üst kısmında bulunan ısıtılmış ayrı bir tartı kovaasına bitüm pompalanır. Bu kova içinde doğru miktarda tartılan bitüm, karıştırıcıya gönderilene kadar burada tutulur [28].

Tartım haznesinde bulunan agrega mikser içine boşaltılır ve beş saniye gibi kısa bir sürede tüm agrega boyutları karışır. Bu kısa kuru karışım sürecinden sonra kovada bekleyen bitüm mikserine boşaltılır ve 25-35 saniye sürececek olan yaş karışım süreci başlar.

Yaş karışım süreci bitümün agrega tanelerini ince bir film tabakası halinde kaplaması için gereken süreden fazla olmamalıdır. Karışım süreci tamamlanmış olup, karıştırıcı altındaki kapak açıldığında karışım kamyonu yüklenebilir.

Mikser kapasitesine göre tek seferde 2-6 ton arasında ürün alınabilir [28].

2.5.2 Drum – Mix tipi asfalt planti

Drum miks plantlerlerde agrega ve bütüm karışımı tambur adı verilen silindir şeklindeki karıştırıcıda gerçekleşir. Bitüm ve agreganın tambur içindeki beslenme yerlerine göre “paralel akımlı tamburda karıştırmalı plantler” ve “ters akımlı tamburda karıştırmalı plantler olarak ikiye ayrılır.

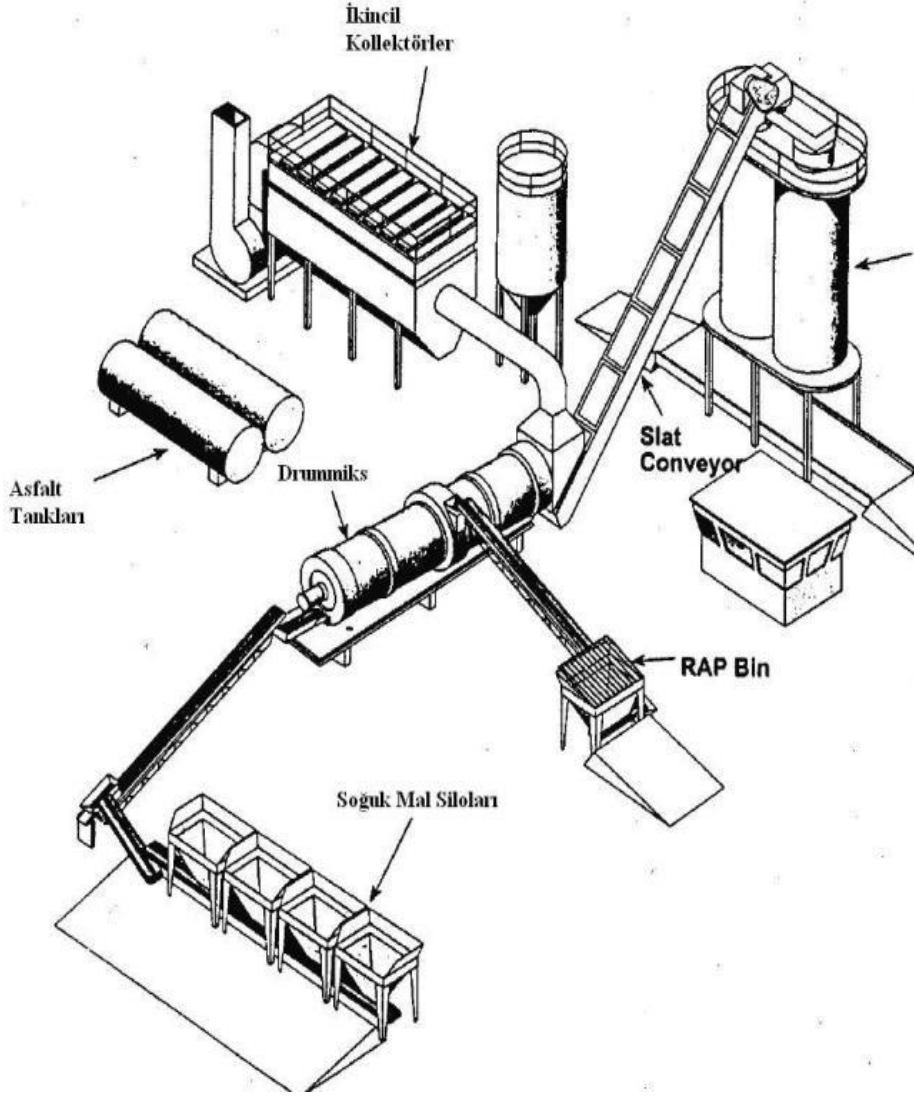
2.5.2.1 Paralel akımlı tamburda karıştırmalı plantler

Bu tip tamburda karıştırmalı plantlerin ana üniteleri Şekil 2.10’da gösterilmiş olup, beş ana kısım bulunur. Bunlar;

- Soğuk besleme sistemi
- Bitüm besleme sistemi
- Tambur (drum) karıştırıcı
- Depo (silo)
- Emisyon kontrol sistemi

Soğuk besleme silo sisteminde her bir silonun altında hızı ayarlanabilen ve agregaları yük konveyörüne taşıyan bir toplama bandı bulunur. Taşınacak malzemelerin miktarı hem bant hızıyla hem de silonun kapak açıklığı ile kontrol edilebilmektedir. Bu şekilde farklı boyutlara sahip agregalar hassas bir şekilde tambur karıştırıcıya gönderilmek üzere yük konveyörüne aktarılır [28].

Şekil 2.10’da paralel akımlı tamburda karıştırmalı plantlerin ana üniteleri gösterilmiştir.

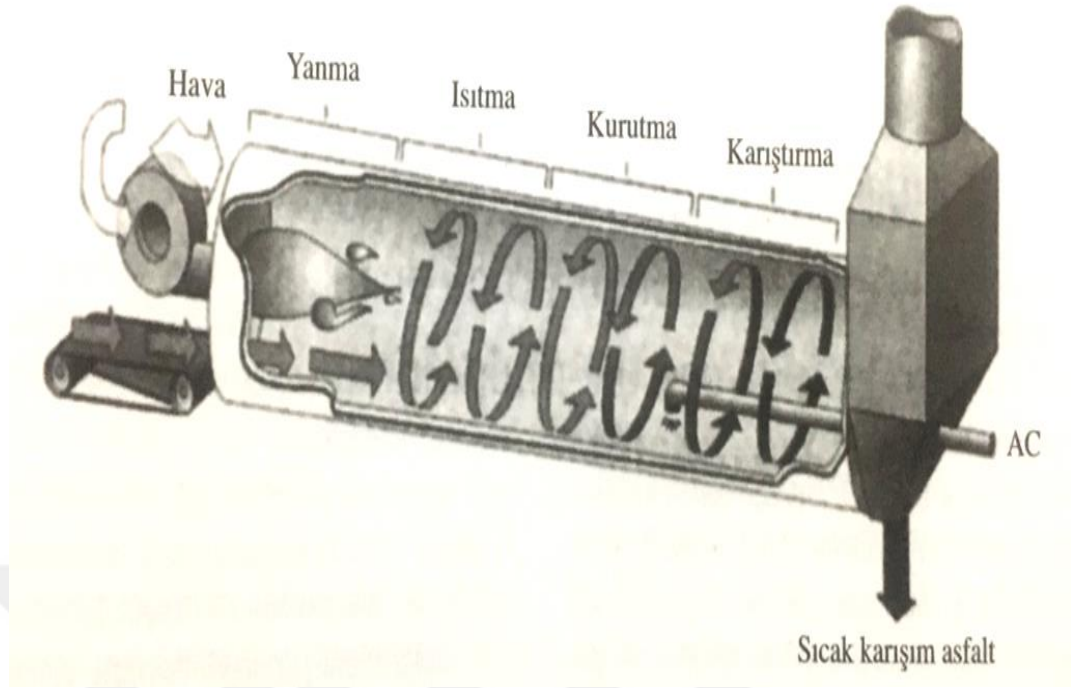


Şekil 2.10 : Paralel Akımlı Tambur Ana Üniteleri [28].

Tambura taşınan agreganın miktarının tesbiti için yükleme konveyöründe, agreganın ağırlığını ölçen bir tartım cihazı ve bant hızını tayin eden bir sensör olmak üzere iki tip cihaz bulunur.

Burada tesbit edilen ağırlık ve hız değerleri tambura giden yaş agreganın ağırlığının ton/saat olarak belirlenmesinde kullanılır. Agreganın nem miktarı sisteme girilerek, plant bilgisayarından yaş ağırlık kuru ağırlığa çevrilir ve karışım için istenilen bitüm miktarı doğru bir şekilde tesbit edilir [28].

Şekil 2.11’de paralel akımlı tamburda karıştırmalı plantlerin karıştırıcı bölümü gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Paralel Akımlı Tambur Karıştırıcı [28]

Kazınmış asfalt kaplama bu plentlere ilave edilerek geri dönüşüm yapılabilir. Bu durumda RAP malzemesi, Şekil 2.10 da gösterildiği gibi kendine ait bir soğuk besleme silosunda depolanır ve tamburun orta kısmından tambur içerisine boşaltılır. Soğuk olarak beslenen RAP malzemesi tambur içerisinde ısıtılır. Karışımında yüksek oranda RAP kullanıldığında, bu işlem sırasında RAP malzemesi çok fazla ısınabilir. Bu durum tamburdan duman yayılmasına sebep olur ve RAP malzemesi zarar görebilir.

2.5.2.2 Ters akımlı tamburda karıştırmalı plentler

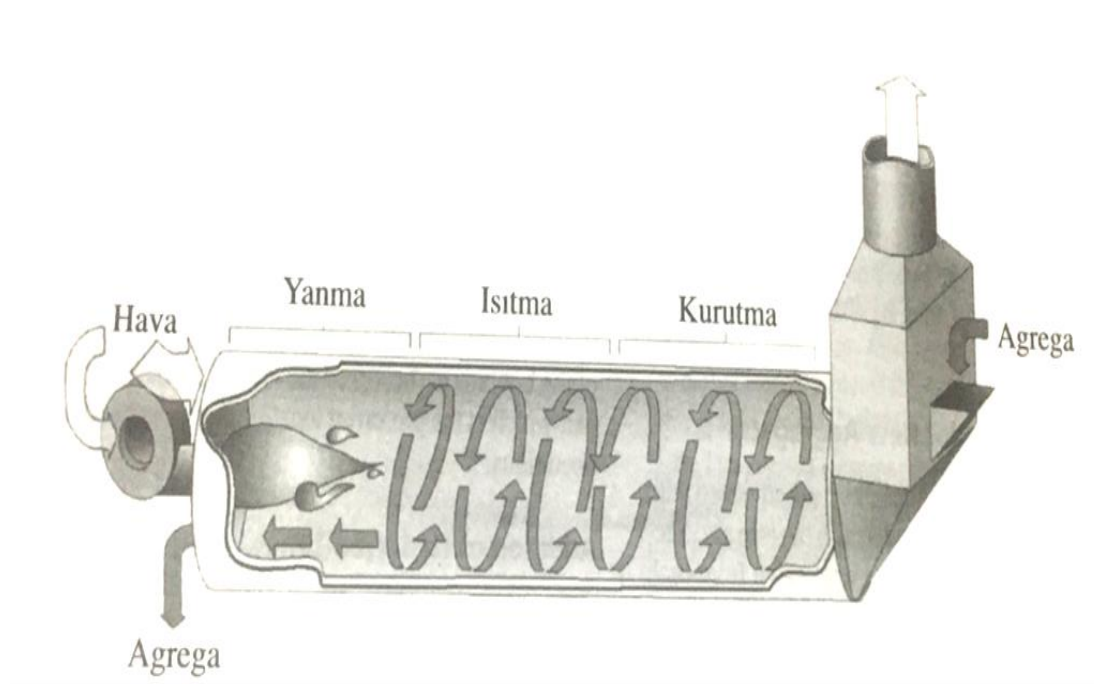
Ters akımlı tamburda karıştırmalı plentler drum-miks tipi plentler içinde en gelişmiş olanlarıdır. Bu plent tasarımında tambur içerisindeki ısı iletim sisteminde değişiklikler yapılarak plent emisyon miktarı azaltılmıştır.

Agrega ısıtma ve kurutma işlemi harman tipi plentlere benzer yapıdadır. Brülör, tamburun alt ucunda bulunur. Agreganın tambur içerisinde aşağı doğru egzoz gazı akımına ters yönde hareket eder. Bitüm ile agreganın karşılaşması kurutucuda gerçekleşmez. Bitümün sıcak ve kuru agregaya ile karışımı grülörün alt kısmında veya arkasında egzoz gazına maruz kalmadan gerçekleşir.

Ters akımlı tamburda karıştırmalı plentlerde RAP malzemesi karışıma eklenerek geri dönüşüm işlemi yapılabilir. RAP malzemesi brülör alevine aynı yönde brülör

arkasından giriş yapar. Bu şekilde brülörden çıkan yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı ile RAP malzemesi temas etmediği için hidrokarbon emisyonu büyük ölçüde azalır. Kurutucunun üst ucunda yüksek ısıya sahip agrega ile RAP malzemesi buluşur ve karıştırıcının çıkış ucu ile brülör arasında tamburun alt kısmında bu iki malzeme karışır.

Ters akımlı tamburda karıştırmalı plentlerde bulunan karıştırıcı Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Ters akımlı tambur karıştırıcı [28].

Ters akımlı tamburda plentlerde iç tambur kurutma, dış tambur karıştırma işlemlerini gerçekleştirir. Agreganın iç tamburda kurutulduktan sonra dış tambura boşaltılır ve bitüm ile burada birleşir. İç tambur dönerken dış tambur hareketsizdir.

RAP malzemesi ve filler gibi malzemeler iç tambur ile dış tambur arasından sisteme dahil edilir. Bu malzemeler brülörden çıkan egzoz gazı ile temas etmediğinden dolayı geri dönüşüm işlemlerinde emisyon miktarı azalır ve çevre kirliliği bir derece azaltılmış olur.

Asfalt plentlerinde RAP malzemesinin yeni karışıma ilave edilmesinin şekline göre sıcak besleme ve soğuk besleme olarak ikiye şekilde uygulama yapılır. Bu plentin bir özelliğidir. Plentte RAP malzemesini de ısıtmak için ilave bir kurutucu bulunursa, RAP malzemesi yeni karışıma ısıtılarak eklenebilecektir.

Bu yöntem sıcak besleme olarak adlandırılmaktadır. İlave kurutucu yok ise, RAP malzemesi kurutucuda ısıtılan yeni karışıma ilave edilir ve belirli bir süre karıştırılır. Bu yöntem soğuk besleme olarak adlandırılır. Soğuk besleme yönteminde ile yapılan uygulamalarda geri kazanım oranı %30'lar civarında kalmaktadır [29].

2.6 Yol Üst Yapısında Bozulmalar

Nüfus, gelişmişlik ve buna bağlı olarak taşıt sayısındaki artışla birlikte ulaşım yollarının kullanımı daha da artmıştır. Yol yüzeyi ne kadar iyi olursa olsun, trafik yükleri ve hava şartları gibi sebeplerle bozulmalar kaçınılmazdır. Yol yapımının oldukça maliyetli bir imalat olması nedeniyle, bakım ve onarım yöntemleri yolun servis ömrünün uzun olması açısından çok önemlidir. Ülkemizde yol inşaatları 20 yıl hizmet ömrü baz alınarak projelendirilmesine rağmen 10 yıl gibi süreler içerisinde onarım gerektirdiği görülmektedir.

Üstyapıda görülen bozulma türlerini dört grupta inceleyebiliriz [13]:

1. Çatlaklar
2. Oturma-tekerlek izi ve dalgalanmalar
3. Ayrılma ve parçalanmalar
4. Kayma direnci kaybı ve kusmalar

2.6.1 Oturma, çökme, ondülasyon ve kabarmalar

2.6.1.1 Tekerlek izi oluşumları

Tekerlek izi şeklinde bozulmalar, genellikle sıcaklık ve ağır taşıt yüklerinin etkisiyle asfalt kaplamanın yer değiştirerek kaplama üzerinde kanal açılması şeklinde ortaya çıkar. Bu tip deformasyonlar kalıcıdır. Taşıtların dingil yüklerindeki artış, yetersiz sıkışma, yol banketinde yanal desteğin yetersiz olmasından kaynaklanan stabilite eksikliği ve ince malzemenin fazla kullanılması bu tip bozulmaların sebeplerindendir [30].

Bu tip yol bozulmalarında hasarın boyutuna göre işlem yapılır. Hasar az ise yüzeyde örtücü bir tabaka yapılarak onarım yapılır. Hasar büyük ise kaplamanın kaldırılarak yeniden düzenlenmesi gerekir. Şekil 2.13'te tekerlek izi oluşumuna bir örnek gösterilmiştir. Bu tip hasarların önüne geçmek için, asfalt betonu bölgenin trafik ve

iklim şartları göz önünde bulundurularak projelendirilmelidir. Bölgedeki sıcaklık koşullarının izin verdiği ölçüde sert bağlayıcı kullanılmalıdır [30].



Şekil 2.13 : Esnek üstyapılarda tekerlek izi türü yol bozulması [25].

2.6.1.2 Oturma

Yol hattının orta kısmı boyunca veya kenar kısımlarda enine ve boyuna oturmalar şeklinde görülür. Bu tip bozulmalarda kaplama tabakası da oturan kısım ile aynı şekli alacak ve çatlama olmadan asfalt kaplama oturacaktır. Ancak, asfalt kaplamanın daha kalın ve rijit olduğu durumlarda çatlamaları görmek mümkündür.

Oturma şeklinde yol bozulmaların sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Alt tabakadaki kalınlık ve sıkıştırmanın yetersiz oluşu.
- Banketlerin yeterli olmaması sebebiyle yan destek sağlayamaması.
- Yer altı su seviyesinin yükselmesi.
- Yetersiz drenaj.
- Temel tabakalarına doğal zeminden gelen kilin karışması.

Tabii zeminin yeterli sıkıştırılması ve yer altı su yüksekliğinin kontrol edilmesi ile yoldaki oturmaların önüne geçilebilir [13].

2.6.1.3 Ondülasyonlar

Trafik yönüne dik yönde asfalt kaplama malzemesinin yer değiştirerek dalgalanmaların oluşması şeklinde bozulmalardır. Bu tip yol bozulmaları genel olarak araçların dur-kalk yaptığı kısımlarda, frenlemenin sıklıkla yapıldığı iniş kısımlarında, taşıtların fiziksel bir engelden dolayı sıçrama yaptıktan sonra çarptığı kısımlarda ve keskin kurlarda görülür.

Şekil 2.14’te görülen ondülasyon türü yol bozulmalarının sebepleri olarak;

- Bitüm oranının fazla olması
- İnce agrega oranının fazla olması
- Yuvarlak agrega kullanılması
- Temel tabakalarının zayıflığı
- Nem miktarının fazla olması
- Üstyapının farklı katmanları arasındaki bağlantının yetersizliği gösterilebilir [30].



Şekil 2.14 : Esnek üstyapılarda Ondülasyon Türü Yol Bozulması [16].

2.6.1.4 Kabarmalar

Doğal zemindeki suyun donma ve çözülmesi sonrasında doğal zeminin şişmesi ve temel tabakalarında donma hassasiyeti olan malzeme kullanılması sebebiyle, kaplama tabakasının Şekil 2.15'teki gibi yukarı yönde deplasman yapması şeklinde görülür [6].

Üstyapı projelendirilirken mevsim şartları ve don etkisi göz önünde bulundurulmalı ve uygun drenaj yöntemleriyle suyun uzaklaştırılması gerekir. Kabarma olduktan sonra yama yapmak geçici bir çözümdür. Kalıcı çözüm için bozulan kısım kaldırılarak uygun malzeme ile yeniden inşa edilir [30].



Şekil 2.15 : Esnek üstyapılarda Kabarma Türü Yol Bozulması [30].

2.6.1.5 Çökmeler

Çökme şeklinde bozulmalarda kaplama tabakasında küçük çukurlar oluşur (Şekil 2.16). Bu çukurlar çatlayarak veya çatlamadan da oluşabilir. Yağmur sonrasında su birikerek çukurların daha da genişler ve yolun bütününe zarar vererek yolu kullanılmaz hale getirebilir.

Sebepleri arasında;

- Temel tabakası ve kaplama tabakasındaki yetersiz sıkıştırma
- Yetersiz drenaj sebebiyle suyun temel tabakasından uzaklaştırılamaması

- Temel ve alttemelin kil ile karışması
- Kaplamanın taşıma gücü üzerinde ağır trafik yüklerine maruz kalması

gösterilebilir.

Yeterli drenaj sisteminin yapılması ve bozulan kısmın kaldırılarak yeniden inşa edilmesi ile tamiri yapılır [6].



Şekil 2.16 : Esnek üstyapılarda çökme şeklinde yol bozulması [13].

2.6.2 Çatlaklar

2.6.2.1 Enine çatlaklar

Yol güzergahına dik yönde oluşmuş çatlaklardır (Şekil 2.17). Çatlak aralıkları genellikle düzenlidir. Enine çatlama şeklindeki yol bozukluklarının sebepleri;

- Üstyapı kalınlığının yetersiz olması
- Drenajın yetersiz olması
- Sıcaklık değişimleri sebebiyle meydana gelen gerilmeler
- Asfaltın yaşlanması

olarak gösterilebilir [30].



Şekil 2.17 : Esnek Üstyapı kaplamalarında enine çatlaklar [31].

2.6.2.2 Timsah sırtı çatlaklar

Timsah derisi şeklinde birbiri ile bağlantılı çatlakların oluşturduğu bozulma şeklidir.

Başlıca sebepleri arasında;

- Ağır dingil yükleri
 - Kaplama ya da temel tabakalarındaki hacimsel değişiklikler
 - Tekrarlı yükler
 - Yetersiz kaplama kalınlığı
 - Yetersiz drenaj
 - Yetersiz temel tabakası kalınlığı
- sayılabilir [6].

Geçici tamir yöntemi olarak yama yapılabilir fakat bu tip bozulmalar genellikle temel tabakalarının doygun hale gelmesi sonucu olduğundan dolayı kalıcı çözüm için bozulan bölgenin kaldırılarak yeterli drenaj sisteminin yapılması ve uygun malzeme ile temel ve kaplamanın yenilenmesi gerekmektedir [30].

Timsah sırtı türü yol bozulmalarına bir örnek Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : Esnek Üstyapılarda timsah sırtı türü yol bozulmaları.

2.6.2.3 Boyuna çatlaklar

Yol güzergahına paralel yönde oluşan çatlaklardır. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi çoğunlukla tekerleğin geçtiği yol kısmına yakın yerde ve şerit ek yerlerinde oluşur.

Boyuna çatlakların oluşma sebepleri:

- Ağır dingil yüklerinden dolayı asfaltın yorulması,
- Yetersiz drenaj
- İklim şartlarından dolayı donma etkisi ve nem değişiklikleri
- Serim sırasında şerit ek yerlerindeki sıkıştırmanın yetersiz olması
- Dolgunun yanal hareketi [30].

Boyuna çatlakların onarımı için suyun zemine geçişini engellemek amacıyla genellikle çatlak tamiri yapılır. Çatlak yapısının yola daha fazla zarar vermesinin önlemek için çatlak hattı kazılarak yama yapılabilir [13].

Esnek üst yapılarda boyuna çatlak şeklinde bir yol bozukluğu Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Esnek üstyapılarda boyuna çatlak şeklinde yol bozukluğu [32].

2.6.2.4 Yorulma çatlakları

Asfaltta oksidasyon sonucu kohezyon artmakta ve rijitlik te buna bağlı olarak artmaktadır. Ağır trafik yükü altında dingil yüklerinin tekrarı sonucunda yorulma çatlakları oluşmakta olup, çoğunlukla ince kaplama tabakalarında görülmektedir [6].

Onarım için çoğunlukla bozulan kısmın sökülerek yeniden yapılması yoluna gidilmelidir.

2.6.2.5 Kenar çatlakları

Banketlerin yeterli yanal desteği sağlayamadığı kısımlarda yol kenarından yaklaşık 30 cm içeride ve yol güzergahına paralel yönde oluştuğu görülmektedir. Başlıca sebepleri, yetersiz drenaj, banket kısımları ile üstyapı arasındaki nem farkı, temel tabakasındaki oturmalar ve don olayları olarak sıralanabilir. Bunların yanında banket kenarındaki ağaç ve bitkilerin yol gövdesinden su çekmesi sebebiyle de oluşabilir [30].

Düşük seviyeli çatlaklar dolgu malzemesi ile doldurularak onarılabilir fakat orta ve ileri derecede olduğunda kaplamanın kazılarak yeniden yapılması ile onarım sağlanabilir.

2.6.2.6 Yansıma çatlakları

Rijit kaplamaların üzerinde uygulanan asfalt kaplamalarında ve çatlakları tamir edilmemiş eski asfalt kaplamaların üzerine yapılan asfalt kaplamalarda görülür. Rijit kaplamalarda altta bulunan beton kaplamanın enine ve boyuna derzleri üst kısımda bulunan asfalt kaplamaya yansır. Yol genişlemelerinde ek yeri kısımlarındaki boyuna çatlaklar da üst kısma atılan asfalt kaplama tabakasına yansır. Bu yöntemlerle sonradan atılan tabakaların ince olmaları halinde yansıma çatlakları daha kolay oluşabilir [30]. Yansıma çatlaklarının bir örneği Şekil 2.20’de gösterilmiştir.

Bu tip çatlakların tek başına bir zararı olmamasına karşın, çatlaklardan su girmesi durumunda yolun parçalara ayrılmasına sebebiyet vereceğinden dolayı çatlakların doldurulması gerekmektedir [6].



Şekil 2.20 : Esnek Üstyapılarda yansıma çatlağı görünümü [30].

2.6.2.7 Kayma çatlakları

Asfalt tabakasının temel tabakası üzerinde veya tabakalar arasındaki yapıştırıcı bitüm üzerinde kayması nedeniyle hilal şeklinde oluşurlar. Ağır taşıtların frenleme yaptıkları kavşak ve çukur gibi yerlerde daha çok görülmektedir [6].

Kayan tabakanın kaldırılması ve yeniden kaplama yapılması şeklinde onarımı yapılır [30].

2.6.3 Ayrılma, ayrışma ve parçalanmalar

İklim şartları veya trafik etkilerinden dolayı asfalt tabakasında bitüm ve mıcırın birbirinden ayrılması şeklinde olmaktadır. Sökülme, çanak şekilli çukurlar ve soyulma şeklinde sıklıkla yollarda rastlanır.

2.6.3.1 Sökülme

Taşıt trafiğinden oluşan yatay kuvvet ve vakumlama etkileri sebebiyle zayıf bağa sahip agregaların yerinden sökülmesi sonucunda oluşur. Çoğunlukla ince daneler daha önce sökülür ve devamında iri daneler de sökülmeğe başlar. Böylece yolda pürüzlenmeler ve düzgün olmayan bir yüzey görünümü ortaya çıkar [30]. Şekil 2.21’de sökülme şeklinde yol bozulması gösterilmiştir.



Şekil 2.21 : Esnek üstyapılarda sökülme şeklinde yol bozulması [30].

2.6.3.2 Çanak şekilli çukurlar

Sökülmenin ileri düzeyde görülmesiyle çapları 25-75 cm arasında değişen çanak şekilli çukurlar oluşmaktadır.

- Trafik etkisiyle agreganın bitümden ayrılması
- Düşük bitüm yüzdesi ile kaplama yapılması
- Çok düşük ya da çok yüksek filler yüzdesi

- Doğal zeminden temel tabakalarına kil malzemesinin yükselmesi
- Drenajın yetersiz olması
- Sıkıştırmanın yetersiz olması

bu tip yol bozulmalarının oluşma sebepleridir [6].

2.6.3.3 Soyulmalar

Asfalt betonu veya sathi kaplama içerisinde agregayı sarmış halde bulunan bitümün su kil ve trafik etkilerinden dolayı agregadan ayrılması olayıdır. Sathi kaplamalarda bitüm agreganın tamamını sarmadığı için, bitümün agregayı tamamen sardığı asfalt betonuna göre soyulma daha fazla görülmektedir.

Bu tip bozulmalar granülometrisi sürekli ve geçirimsiz kabul edilebilen asfalt betonu kaplamalarda çok görülmediğinden dolayı, asfalt betonu kaplamalar için önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Agregada danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması ve dolayısı ile agregada danelerinin çıplak kalması olayıdır [30].

2.6.4 Kayma direnci kaybı ve kusmalar

2.6.4.1 Cilalanma

Çoğunlukla yüzeyde asfalt filmi oluşur ve agregada trafiğin etkileriyle cilalanarak yol yüzeyi kaygan hale gelir. Doğal hali cilalı olan ve düzgün yüzeye sahip agregaların asfalt betonunda kullanılmadan önce kırılarak kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde cilalanmış malzeme ıslandığında kaygan hale gelerek kazalara sebebiyet vermektedir [6].

2.6.4.2 Kasma

Asfalt betonu içerisindeki bitümün sıcaklık etkisiyle yüzeye hareket ederek burada bir film tabakası oluşturması şeklinde görülmektedir.

Çoğunlukla karışımlarda yüksek bitüm yüzdesi kullanılması sebebiyle sıcaklığın da etkisiyle ortaya çıkar. Yüzeye çıkan bitüm tabakası araç lastikleriyle olan sürtünme katsayısını düşürür, ayrıca içeride kalan bitüm nispeten serbest hale geçerek daneler arasındaki sürtünmeyi azaltır ve bu durum danelerin kuvvet karşısında deplasman yapmasına sebep olur. Yüksek dingil yükleri altında, astar ve yapıştırma tabakalarının kalın olması durumunda da bu bitüm yüzeye hareket ederek kasmaya sebep olabilir.

Sık görülen kuma türü bozulmaların önlenmesi için bitüm oranı ve boşluk yüzdesinin optimum değerlerde olması gerekmektedir [30].

2.7 Asfaltta geri dönüşüm yöntemleri

Yoldaki bozulma türleri ve yapısal gereksinimler için farklı geri dönüşüm methodları uygulanmaktadır. Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği (Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA) tarafından beş çeşit geri dönüşüm yöntemi tarif edilmektedir.

- Soğuk düzeltme (Cold planing),
- Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling),
- Sıcak yerinde geri dönüşüm (Hot in-place recycling),
- Soğuk geri dönüşüm (Cold in-place recycling)
- Tam derinlikten geri kazanma (Full depth reclamation) [14].

Bu çalışmada anlatılan yöntem Sıcak Geri Dönüşüm'dür. Bu yöntemde RAP malzemesi belli oranlarda yeni malzeme ile harmanlanarak yeniden değerlendirilmektedir. Harman tipi ve Batch tipi plantler bu karışımları yapmak için uygundur. RAP malzemesinin karışımda yeni asfalt ile birlikte kullanılma oranı için RAP malzemesinin karıştırıcıya hangi sıcaklıkta verildiği önemlidir.

RAP malzemesi eğer soğuk bir şekilde karıştırıcıya veriliyorsa %10-30 oranlarında, ısıtılarak veriliyorsa %80 oranına kadar karışıma katılabilmektedir. Sıcak geri dönüşüm yöntemiyle üretilen kaplamaların geleneksel bitümlü sıcak karışımlarla eşit veya yakın performansa sahip olduğu görülmektedir [14].

2.7.1 Soğuk düzeltme (Cold planing)

Bu düzeltme yönteminde tekerlek izi, çukur vb. yüzeysel bozuklukları onarmak için asfalt kaplama istenilen derinlikte kazılır ve arzu edilen eğimde yeni bir yüzey elde edilmiş olur. Bu şekilde yüzey iyileştirilmesi sağlanır. Ayrıca yüzey sürtünme direncini arttırmak ve pürüzlendirme yapmak için kullanılabilir [23]. Soğuk düzeltme uygulaması Şekil 2.22'de gösterilmiştir.

Soğuk düzeltme yönteminin sağladığı faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- Tekerlek izleri vb. bozulma türlerinin veya okside olmuş kaplamanın kaldırılarak onarılması

- Kaplamanın enine ve boyuna eğiminin istenildiği şekilde ayarlanabilmesi
- Yüzey drenajının değiştirilebilmesi
- Çatlak ve bozuk kısımların doğru bir şekilde sökülerek onarım işlemleri için ön hazırlık yapılabilmesi
- Daha sonra yapılması düşünülen ilave geri dönüşüm yöntemi için uygun zemin hazırlanması
- Sürtünme direncinin artırılması
- Diğer yöntemlere göre daha düşük enerji tüketimi ve çevreye daha az rahatsızlık verilmesi [33].



Şekil 2.22 : Soğuk Düzeltme (Cold Planing) uygulaması [34].

2.7.2 Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling)

Bu yöntem kazınmış asfalt kaplamanın harman veya tambur tipi plentlerde, yeni agrega ve bitüm ile arzu edilen oranlarda karıştırılması şeklinde yapılmaktadır. RAP malzemesinin plente soğuk besleme yöntemiyle verilmesi, sıcak besleme yöntemine göre RAP malzemesinden daha az yararlanma imkanı tanır. Sıcak besleme yapılan plentlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olduğundan dolayı soğuk besleme daha

yaygın kullanılmaktadır. Soğuk besleme kısa vadede ekonomik olarak gözükse de, sıcak besleme yöntemi uzun vadede daha ekonomik olmaktadır.

KTŞ Kısım 414'te RAP malzemesinin yeni malzemeye karışım oranının %25 değerini aşamayacağı ve aşınma tabakasında RAP katkılı asfaltın kullanılamayacağı, ancak bu oran kullanılacak plent tipi ve gençleştirici katkıları ile arttırılabileceği belirtilmektedir [13].

2.7.3 Sıcak yerinde geri dönüşüm (Hot in-place recycling)

Bu yöntemde asfalt trimmer makinesi kazıdığı asfaltı hemen arkasından gelen mobil asfalt plentine aktarır ve burada RAP malzemesine agrega, bitüm ve katkı maddesi eklenir, belli sıcaklıklarda ısıtılır ve karıştırılır. Daha sonra oluşan karışımı hemen arkasında bulunan finişere aktarır ve serme-sıkıştırma işleminden sonra işlem tamamlanır. Sıcak yerinde geri dönüşüm yöntemi ile;

- Çatlak, ondülasyon, tekerlek izi, çukurlanma gibi yol bozuklukları tamir edilebilir,
- Servis ömrü boyunca yaşanan bitümlü bağlayıcının gençleştirilmesi sağlanır,
- Hızlı yapıldığından dolayı trafik kesinti süresi daha azdır,
- Nakliye masrafları minimumdur [7].

Sıcak yerinde geri dönüşüm yöntemi üç şekilde uygulanabilir;

- Yüzeysel Geri Dönüşüm (Surface Recycling)
- Yeniden Karıştırma (Remixing)
- Yeniden Kaplama (Repaving) Yüzeysel Geri Dönüşüm [7].

Sıcak yerinde geri dönüşüm uygulamasında yollardan kırılarak blok halinde sökülen asfalt betonu kaplamalar, ısıtıcı makinelere aynı şekilde blok halinde atılmaktadır. Isıtıcı makinede parçalanmış ve ısıtılan asfalt malzemesi ile makinenin diğer ucunda doğrudan serim işlemi yapılmaktadır.

Yerinde geri dönüşüm uygulanarak yapılan bu uygulama son derece pratiktir. Yollarda bozulan asfalt betonu kaplamalar herhangi bir ek asfalt gerektirmeden yerinde geri dönüştürülerek kullanılabilir. Yama uygulamaları için kullanışlıdır [23].

Sıcak yerinde geri dönüşüm uygulaması Şekil 2.23'te gösterilmiştir.



Şekil 2.23 : Sıcak yerinde dönüşüm uygulaması [35].

2.7.3.1 Yüzeysel geri dönüşüm

Bu yöntemde ısıtıcı makineler ile yüzey ısıtılır ve kaplama yerinden sökülür. Karışıma yeni agrega veya bitüm karıştırılmaz. Bu yüzden bu yöntemin trafik yoğunluğu düşük olan yollarda uygulanması önerilir. Gerekli ise katkı maddesi karıştırılır ve serimi yapılır. En önemli avantajı sökülen malzeme kullanıldığı için mevcut kaplama kalınlığı değişmemektedir [13].

2.7.3.2 Yeniden karıştırma yöntemi

Bu yöntemde kaplama tabakası ısıtılır ve yumuşak hale geldikten sonra kazılarak yeni bitüm, yeni agrega ve gerektiği takdirde katkı maddeleri ile karıştırılır ve yeniden yola serilir. Yüzeysel geri dönüşümden farklı olarak daha fazla derinlikte işlem yapılabilmektedir [13].

2.7.3.3 Yeniden kaplama yöntemi

Yeniden kaplama yöntemi yüzeysel geri dönüşüm ve yeniden karıştırma yöntemlerinin birleştirilmesiyle, yeni bitümlü sıcak karışım tabakasının serilmesinin eş zamanlı

olarak yapılmasıyla meydana gelir. Yüzeysel geri dönüşüm veya yeniden karıştırma aşamasından geçen kaplama ve serilecek olan (BSK) birlikte sıkıştırılır [7].

2.7.4 Soğuk geri dönüşüm (cold in-place recycling)

Bu yöntemde mevcut kaplama malzemesi ısıtılmadan tekrar kullanılır. Katkı malzemesi olarak bitüm emisyonu kullanılabilir. Mevcut kaplama boyutu düşürülerek katkı malzemesi ile karıştırılır ve daha sonra serilip sıkıştırılır.

Katkı malzemesi dışında bir malzemeye ihtiyaç duyulmadığı için nakliye maliyetleri çok azdır. 75 mm' den 100 mm'ye kadar değişen derinliklerde uygulanabilir [13].

2.7.4.1 Soğuk yerinde geri dönüşüm

Bu yöntemde sırasıyla kazıma makinesi, parçalama ve eleme birimleri, serici ve sıkıştırıcı makinelerinden oluşan bir katar ile yerinde geri dönüşüm yapılmaktadır. Genellikle 10-15 cm derinliğine kadar iyileştirme uygulaması yapılabilmektedir [13].

Şekil 2.24'te soğuk yerinde geri dönüşüm uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Soğuk yerinde geri dönüşüm uygulaması [13].

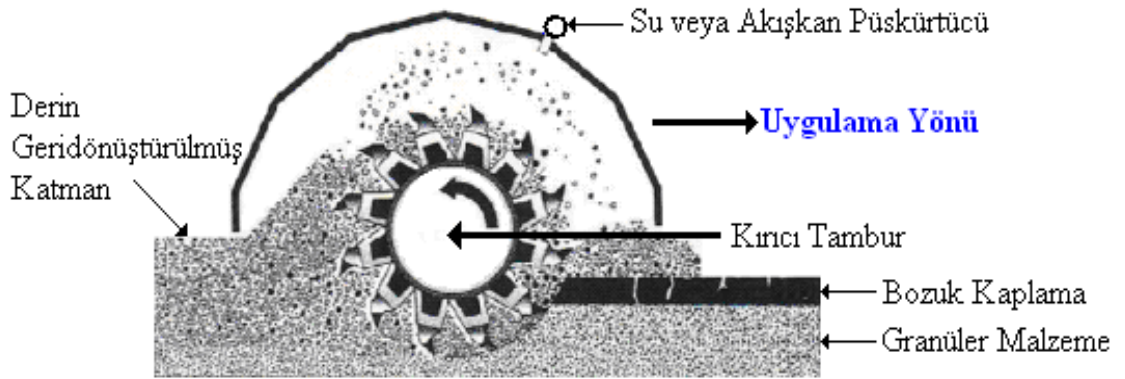
2.7.4.2 Soğuk merkezi plentte geri dönüşüm

Genellikle bakım onarım uygulamalarında kullanılan bu yöntemde, yoldan kazınan malzeme merkezi bir plente taşınarak gerekli katkı ilavelerinden sonra ısıtıl işlem uygulanmaksızın geri dönüşüm işlemi yapılır [13].

2.7.5 Tam derinlikten geri kazanma

Bu yöntemde kaplama ve temel tabakaları hesaplanan kalınlıkta kaldırılır, homojen bir temel tabakası elde etmek için öğütme ve karıştırma işlemlerinden sonra yeniden yola serilir. Yoldan kaldırılan malzemeye gerektiği takdirde yeni malzeme ilave edilerek, sırasıyla karışımın düzenlenmesi, sıkıştırma, son düzenleme ve bitümlü yüzey uygulaması yapılır. Karışıma herhangi bir ısıtıl işlem uygulanmaz ve uygulama derinliği mevcut kaplamanın yapısına bağlı olarak 10-30 cm arasında değişir [30].

Tam derinlikten geri kazanma yöntemi şematik olarak Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2.25 : Tam derinlikten geri kazanma yöntemi şematik gösterimi [30].



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, İstanbul Avrupa Yakası'nın çeşitli bölgelerinden kazınan asfalt kaplamaların, sıcak geri dönüşüm yöntemi ile binder tabakasında yeniden kullanılabilirliği araştırılmıştır. İsfalt Habibler Fabrikasında depolanmış halde bulunan RAP malzemeleri, İsfalt Labaratuarında binder tabakası olarak tasarımı yapılan karışımlara, ağırlıkça %15, %30 ve %45 olmak üzere 3 farklı oranda eklenmiştir. Bu oranlar, ilave edilecek RAP malzemesi agrega ağırlığının, karışımdaki toplam agrega ağırlığına oranıdır. Karışım binder tabakası olarak tasarlanmıştır. Karışım numunelerine ve RAP katkısız olarak hazırlanan numunelere Marshall Deneyleri, Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyleri ve Tekerlek İzi Deneyleri uygulanarak, bulunan değerlerin KTŞ standartlarına uygunluğu irdelenmiş ve deney sonuçları kıyaslanarak RAP oranları değişiminin asfaltın performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

3.1 RAP Oranlarının Seçimi

Bitüm ve agreganın birlikte çalışma davranışı yalnızca bitümün özelliklerine bağlı değildir. Yol servis ömrü boyunca hava şartlarına maruz kaldıkça, viskozite, yüzey gerilimi ve bağlayıcı bileşiminde bazı değişimler görülmektedir. Bu değişimler aynı zamanda plentte karışım sırasında da gözlenmekte ve bitümün yaşlanması söz konusu olmaktadır. Bu yaşlanmanın mukavemete olan etkileri ve bitümün sertleşmesi konusu günümüzde halen araştırılmaktadır [15].

RAP malzemesinin yüksek oranlarda yeni karışıma ilave edilmesi durumunda, bitümdeki yaşlanmanın giderilmesi amacıyla gençleştirici katkıların kullanılması gerekli olmaktadır. Gençleştirici katkıların yüksek maliyetli olmaları sebebiyle, kullanılmaları durumunda geri dönüşümdeki ekonomik avantajlar kaybolabilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada gençleştirici katkı kullanılmamış ve bu katkılara ihtiyaç duyulmayacağı oranlarda çalışma yapılmıştır.

Konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalardan Salih Mazlum (2012) çalışmasında, eski asfalt kaplamayı %10, %25 ve %40 oranlarında yeni bitümlü sıcak kaplama ile

kariştırarak karişımıların performanslarını incelemiştir. Bu çalışmada farklı karişım oranlarını da incelemek üzere karişıdaki RAP malzemesi oranı %15, %30 ve %45 olarak seçilmiştir.

3.2 RAP Malzemesinin Temini

İstanbul Avrupa Yakası'nda yol bakım, onarım, tamirat gibi çeşitli sebeplerle kazınan asfalt kaplamalar geri dönüştürülmek üzere İsfalt Habibler Fabrikasında depolanmaktadır. Deneylerde kullanılacak olan RAP malzemeleri İsfalt Habibler Fabrikası depolama alanından temin edilmiştir. Karişımlarda kullanılan agregalar İstanbul Cebeci bölgesinde bulunan taş ocaklarından temin edilmiştir. Kazınan asfalt kaplamalar Cebeci bölgesinden temin edilen agregalar ile imal edildiğinden dolayı RAP malzemesinin agregaları ile ocaktan temin edilen agregalar benzer özellikler taşımaktadır. RAP malzemesi temini üç aşamada gerçekleşmiştir.

- Kaplamanın kazılması ve sökülmesi
- Malzemenin konkasörde kırılarak boyutlarının düşürülmesi
- Depolama

3.2.1 Kaplamanın kazılması ve sökülmesi

Asfalt betonu kaplamanın kazılması ve sökülmesi için en çok kullanılan yöntem trimmer ile soğuk frezeleme yöntemidir. Bu alışmada İstanbul Avrupa Yakasının farklı bölgelerinden trimmer makinesi ile kazınan asfalt kullanılmıştır. KTş kısım 413'te asfalt kazıma makinesinin şu özelliklere sahip olması gerektiği belirtilmiştir.

- Kazıma makinesi kendinden hareketli/kendi yrr olacaktır.
- Makine yeterli güce ve çekiş gücüne sahip olacak, kesme derinliğı doğru, tamdzgn bir şekilde ve srekliplik sağlayacak şekilde sürdürebilecektir.
- Yolun boyuna ve enine eğimini sağlamak için gereken asfalt kaplama kalınlığını kazıyacak kapasiteye sahip olacaktır.
- Boyuna ve enine eğim kot kontrolünü doğru ve hassas bir şekilde yapacak otomatik sisteme sahip olacaktır.
- Kazıma sırasında oluşabilecek toz ve parçaların dışarıya gitmesini etkili olarak önleyecek bir sisteme sahip olacaktır.

- Kazıma hızına uygun olarak kazınan malzemenin tamamını yoldan alıp yükleyecek bir sistemi olacaktır.
- Kazıma genişliği eşit olacak ve bir seferde bir şeridin en az 1/3 genişliğini kazıyabilecektir.

Soğuk yüzey düzeltme olarak da adlandırılan bu kazıma yöntemi ayrıca yüzeydeki kot farklarını düzeltme amacıyla da kullanılabilir. Bu kazıma işlemi 0,15 m ile 4 m gibi farklı genişliklerde yapılabilir. Kazıma makinesi finişerlerde olduğu gibi otomatik eğim ve kot ayarlama sistemlerine sahipse, kazınan yüzey üzerinde düzgün bir satıh oluşturur. Bu yüzeyde asfalt seriminden önce toz ve kirden arındırılması için yıkanır, ortaya çıkan pürüzlü yapı yeni serilecek asfalt ile iyi bir aderans sağlayarak kayma ihtimalini azaltacaktır [28]. Şekil 3.1’de asfalt kazıma makinesinin çalışma görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Asfalt kazıma makinesi çalışma görüntüsü [36].

3.2.2 Malzemenin konkasörde kırılarak boyutlarının düşürülmesi

KTŞ Kısım 413’te farklı tip bitümlü kaplamaların (aşınma, binder, bitümlü temel) ayrı ayrı kazılması ve depolanması gerektiği belirtilmiştir. Ancak, uygulamada bu durum tam anlamıyla sağlanamadığından dolayı bu üç tabaka kazınırken karışmakta ve granülometri özellikleri kaybolmaktadır.

Şekil 3.2’de agrega dane boyutlarının düşürülmesi için kullanılan konkasörler gösterilmiştir.

RAP malzemesinin geri dönüşüm işlemlerinde kullanılabilmesi için konkasörden geçirmenin birkaç sebebi vardır. Bunlar;

- Trimer makinesi ile soğuk kazıma yapılmış ise, iri taneli agregaların plentin karıştırıcısında yeteri kadar ısınamayacak olması ve bitüm ile karışım sağlanamayacağı, bu nedenle trimer ile sökülen RAP malzemesinin de konkasörden geçirilerek boyutlarının düşürülmesi [28].
- Asfalt kazıma işlemi kırıcı ile yapıldığından dolayı büyük parça ve bloklar halinde ise, bu parçaların konkasörde kırıldıktan sonra uygun boyutlarda plente verilmesi [28].
- Trimer kazıyıcı ile bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından sökülen atık asfalt malzemesi agregalarının, binder tabakası için şartnamede belirtilen granülometri limitlerinde kalmasını sağlamak.
- Taşıma veya deploama esnasında yapışarak bir araya gelen RAP malzemesinin ayrılması.



Şekil 3.2 : Agrega boyutlarının düşürülmesi için kullanılan konkasörler.

3.2.3 Depolama

Kazınan asfalt malzemesinin depolama tekniği agregaya için uygulanan depolama tekniği ile aynıdır. Sıcak karışım asfaltın kalitesini ilk olarak karışımı oluşturan ve plente giren agregaya ve RAP malzemesinin depolanması belirler [28].

RAP malzemesinin depolanırken yığın yüksekliği 3 metreyi geçmemelidir. Bu şekilde RAP malzemesinin kendi ağırlığı ve sıcaklığın etkisiyle birbirine yapışması önlenir. Aynı şekilde, yığınlar üzerinde yükleyici, kamyon gibi yüksek tonajlı araçların çıkarmaması gerekmektedir. Depolanan malzeme nem etkilerinden korunmalı ve kuru koşullarda muhafaza edilmelidir. Kış aylarında kazıma ve kırma işlemleri yapıldığında, malzeme üzerinde örtü serilerek depolanmalıdır [14].

3.3 Marshall Deneyleri

Amerika’da Karayolu Mississippi Departmanı Mühendisi Bruce Marshall tarafından 1939 yılında Marshall Methodu bulunmuştur. Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği 1943 yılında trafik yükleri ve granülometri fonksiyonlarına dayanarak optimum bitüm oranı tayininde Marshall Methodunu kabul etmiştir. Bu method ile istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerleri hesaplanır ve optimum bitüm oranı tayininde kullanılır [37]. Marshall methodu, bitümlü sıcak karışımların tasarımı için hemen hemen tüm dünyada kabul görmüş ve kullanılan bir yöntemdir. Test için kullanılan yol ve yöntemler AASHTO (Amerikan Eyalet Otoyol ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği) ve ASTM (Amerikan Malzeme ve Test Birliği – American Society for Testing and Materials) kurumları tarafından standart haline getirilmiştir [38].

KTŞ’de bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların fiziksel özellikleri ve granülometreleri belirtilmiştir. Bu değerlere göre karışım tasarımı yapıldıktan sonra, karışımda kullanılacak bitüm miktarının tayini için dünyada en çok kullanılan yöntem Marshall Methodudur. Tüm mühendislik malzemelerinin tasarım ve üretiminde olduğu gibi, Marshall Methodu ile asfalt kaplama imalatının uzun servis ömrüne sahip olması amaçlanır [39].

Bu çalışmada Marshall Deneyleri için sırasıyla şu işlemler yapılmıştır:

- RAP malzemesinin içeriğinin belirlenmesi
- RAP malzemesinin granülometrisinin belirlenmesi

- Ocaktan agregat temini ve agregat granülometrisinin belirlenmesi
- Karışım tasarımı yapılması
- Numunelerin hazırlanması
- Numunelerin boşluk-yoğunluk değerlerinin bulunması
- Marshall test cihazı ile akma-stabilite tayini

3.3.1 RAP malzemesinin içeriğinin belirlenmesi

Bitüm ve agregadan oluşan RAP malzemesinin içeriğini tesbit etmek amacıyla Şekil 3.3'te gösterilen asfalt analizatör cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz bitüm ile agregayı etilen yardımıyla birbirinden ayırır. Ayrılan bitüm ve agregaların ağırlıkları ölçülerek RAP malzemesinin içerdiği bitüm ve agregat yüzdesi belirlenir.



Şekil 3.3 : Asfalt analizatör makinesi görünümü.

Asfalt analizatör makinesinde toplam 1237,3 gr bitüm ve agreganın ayrışması sonrasında agregat miktarı tartılarak 1206,5 gr olarak bulunmuştur.

$$\text{Bitüm Oranı} = \frac{\text{İlk Tartım} - \text{Son Tartım}}{\text{İlk Tartım}} \times 100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1 ile bitüm oranı %2,5 olarak bulunmuştur.

3.3.2 RAP malzemesinin granülometrisinin belirlenmesi

Bitüm ve agrega miktarı belirlenen RAP malzemesinin agregaları yıkanmış ve bu sayede fillerden arındırılmıştır. Akan filler malzemesi, Şekil 3.4'teki gibi 0,074 mm'lik elek içerisine akıtılmıştır. Bu işlem birkaç kere tekrarlanarak agreganın fillerden tamamen ayrılması sağlanmış ve ayrılan fillerin miktarı ölçülmüştür.



Şekil 3.4 : Rap Malzemesi Agregalarının Yıkanması.

Yıkanarak fillerden ayrılan agregalar sudan arındırılarak kurutulması amacıyla etüve konulmuştur. Etüvde 110 °C sıcaklıkta sabit kütleye gelene kadar bekletildikten sonra elek analizine hazır hale gelmiştir. Daha sonra malzemeler eleklerde elenmiş ve her bir elekten geçen malzeme miktarı hassas tartı ile tartılarak not edilmiştir. RAP malzemesi agregalarına ait elek analizi sonucu Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Rap malzemesi agrega elek analizi sonucu.

	1"	¾"	½"	3/8"	No:4	No:10	No:40	No:80	No:200
Elek	25,46	19,1	12,7	9,52	4,76	2,00	0,42	0,18	0,075
Geçen (%)	100	98,8	92	80,3	57,9	38,9	21,5	16,3	12,6

3.3.3 Bitüm deneyleri

3.3.3.1 Penetrasyon deneyi

Bitüm penetrasyon deneyi, asfaltın sertlik veya kıvamlılığını belirtir. Bitümün kıvamlılığı arttıkça bağlayıcılığı da artar. Penetrasyon değerinin yüksek olması, bitümlü bağlayıcının yumuşak ve az kıvamlı olduğu anlamına gelir. Standart bir iğnenin belirli bir yük altında (100 g), belirli bir süre içerisinde (5 sn) ve 25°C sıcaklıktaki bitüm numunesi içerisine dikey olarak batma mesafesidir. Deney için alınan bitüm numunesi etüvde ısıtılmış ve hava kabarcıkları kaybolup, homojen oluncaya kadar karıştırılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında 1,5 saat kadar bekletilerek soğutulduktan sonra 1,5 saat boyunca 25°C sıcaklığındaki su banyosunda bekletilmiştir. Su banyosundan sonra penetrasyon cihazına yerleştirilen numune kabı, içerisinde su bulunan taşıma kabına hareket etmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Serbest düşme hareketi ile bırakılan penetrasyon iğnesinin 5 saniye sonra numuneye batma miktarı penetrasyon değeri olarak okunmuştur.

3.3.3.2 Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık, belli bir hacme sahip numune ağırlığının aynı hacimdeki +4°C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlık deneyi bitümlü sıcak karışımlarda boşluk yüzdesinin hesabı ve agreganın hacim-ağırlık bağıntılarını tesbit etmek için yapılır [40]. Bitümün özgül ağırlıklarının tesbiti için piknometre yöntemi kullanılmıştır. Sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

- Piknometre temizlendikten sonra kurutularak hassas terazi ile tartılmıştır (A).
- İçerisine saf su konularak 25°C sıcaklıkta 40 dakika bekletilmiş ve tekrar tartılmıştır (B).
- Bitüm ısıtılarak piknometrenin yarısını dolduracak şekilde doldurulmuş ve kapağı ile birlikte tartılmıştır (C).
- Bu numuneye su ilave edilerek 25°C'lik su banyosunda 40 dakika bekletilmiş ve yüzeyi kurutularak tekrar tartılmıştır (D).

Özgül ağırlıklar aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.2)$$

Hesaplanan penetrasyon ve özgül ağırlık değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Bitüm Deney Sonuçları.

Deney Adı	RAP	Normal	Deney	Şartname (TS EN)
Penetrasyon (25°C,100g,5sn)	33	55	TS EN 1426	50-70
Özgül Ağırlık	1,029	1,024	TS 1087	-

Karışımların penetrasyon değerini bulmak için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$a \lg \text{pen}_1 + b \lg \text{pen}_2 = (a + b) \lg \text{pen}_{\text{mix}} \quad (3.3)$$

pen_{mix} :Bitüm karışımının penetrasyonu

pen_1 :Geri kazanılmış bitümün penetrasyonu

pen_2 :Normal bitümün penetrasyonu

a ve b : Geri kazanılmış bitümün (a) ve, normal bitümün (b) kütlece oranı. (a+b=1)

3.3.4 Karışım tasarımı yapılması

RAP malzemesi agregaları elek analizleri sonucu granülometri değerleri Çizelge 3.1 verilmiştir. RAP agregası ve ocaktan gelen agregaların karışımı sonucu RAP Katkısız, %15 RAP Katkılı, %30 RAP Katkılı ve %45 RAP Katkılı karışımların tasarımı KTŞ’ye göre ayrı ayrı belirlenmiştir. KTŞ binder tabakası granülometri limitleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : KTŞ binder tabakası granülometri limitleri.

Elek Boyu mm (in,No)	% Geçen
25 (1’')	100
19 (¾’')	95,5
12,5 (½’')	69,9
9,5 (3/8’')	59,0
4,75 (No 4)	42,8
2,00 (No 10)	24,2
0,425 (No 40)	12,0
0,180 (No 80)	7,8
0,075 (No 200)	4,5

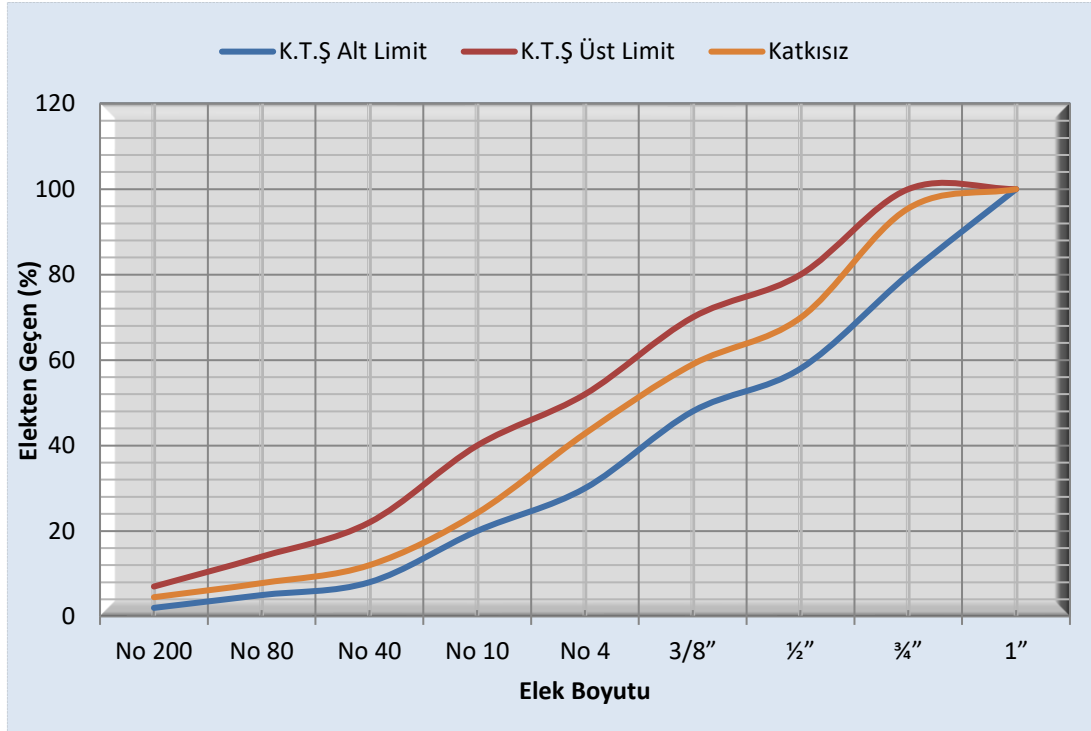
3.3.4.1 RAP katkısız karışım tasarımı

Sadece ocak malzemesi agregaları kullanılarak yapılan RAP katkısız karışım tasarımının KTŞ binder tabakası kriterlerine göre belirlenen granülometri değerleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : RAP katkısız karışım granülometrisi.

Elek No	Karışım	Şartname
1”	100	100-100
¾”	95,5	80-100
½”	69,9	58-80
3/8”	59,0	48-70
No 4	42,8	30-52
No 10	24,2	20-40
No 40	12,0	8-22
No 80	7,8	5-14
No 200	4,5	2-7

Çizelge 3.4’te görülmekte olan RAP katkısız karışım granülometrilerinin KTŞ binder tabakası granülometrisine uygunluğu Şekil 3.5’te grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : RAP katkısız numune granülometri grafiği.

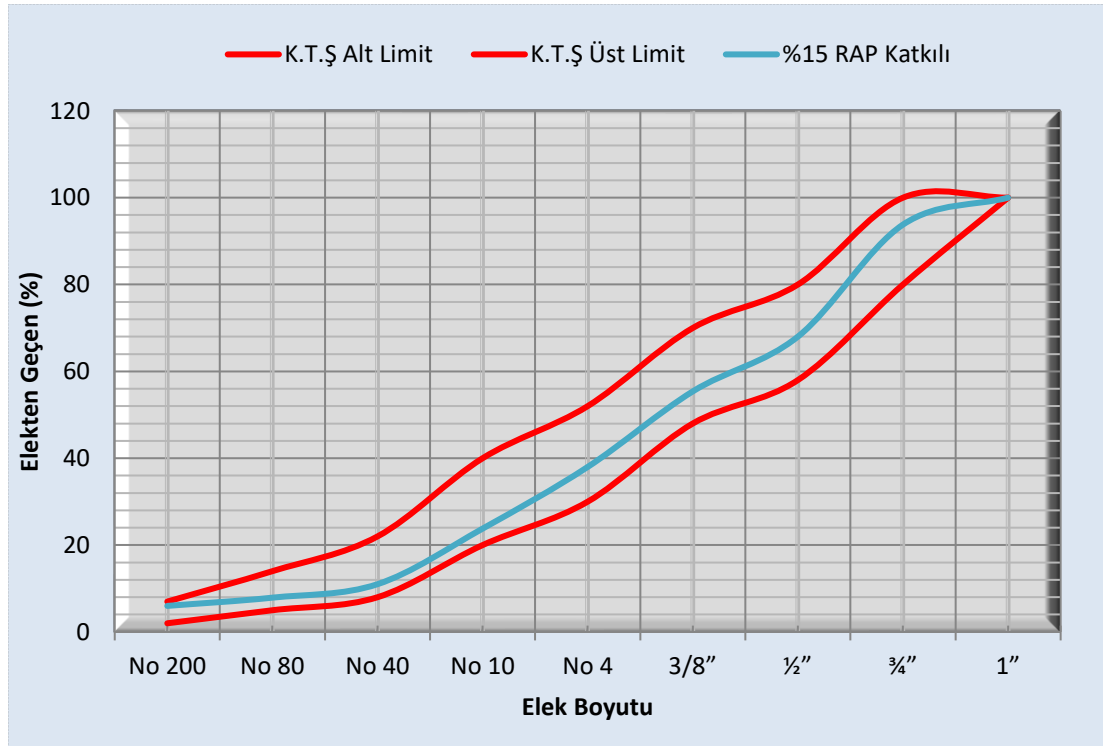
3.3.4.2 %15 RAP katkıli karışım tasarımı

RAP malzemesi agregaları ve ocak malzemesi agregaları ile yapılan %15 RAP katkıli karışım tasarımının, KTŞ binder tabakası kriterlerine göre belirlenen granülometri değerleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : % 15 RAP katkıli karışım granülometrisi.

Elek No	Karışım	Şartname
1”	100	100-100
¾”	93,8	80-100
½”	68,0	58-80
3/8”	55,4	48-70
No 4	38,0	30-52
No 10	23,8	20-40
No 40	11,0	8-22
No 80	7,9	5-14
No 200	6,0	2-7

Çizelge 3.6’da görülmekte olan %15 RAP katkıli karışım granülometrisinin KTŞ standartlarına uygunluğu Şekil 3.6’da grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : % 15 RAP katkıli karışım granülometri grafiği.

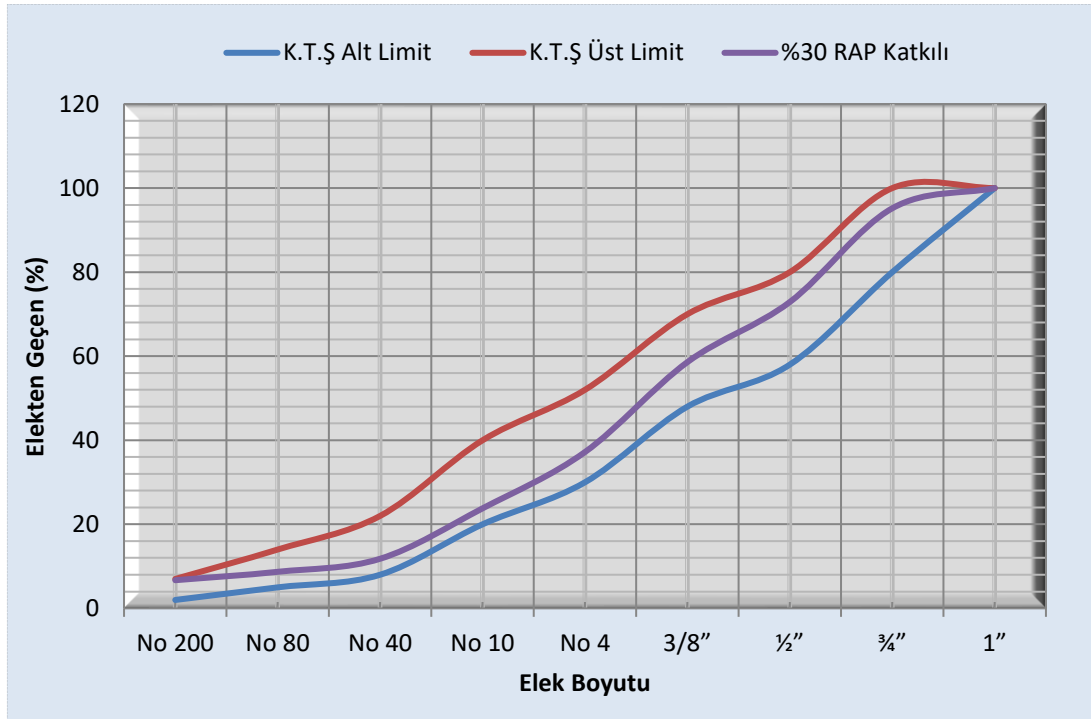
3.3.4.3 %30 RAP katkıli karışım tasarımı

RAP malzemesi agregaları ve ocak malzemesi agregalarının belirli oranları ile yapılan %30 RAP katkıli karışım tasarımının, KTŞ binder tabakası kriterlerine göre belirlenen granülometri değerleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : % 30 RAP katkıli numune karışım granülometrisi.

Elek No	Karışım	Şartname
1”	100,0	100-100
¾”	95,2	80-100
½”	72,9	58-80
3/8”	58,6	48-70
No 4	37,2	30-52
No 10	23,8	20-40
No 40	11,8	8-22
No 80	8,7	5-14
No 200	6,7	2-7

Çizelge 3.6’da görülmekte olan %30 RAP katkıli karışım granülometrisinin KTŞ standartlarına uygunluğu Şekil 3.7’de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.7 : % 30 RAP katkıli karışım granülometri grafiği.

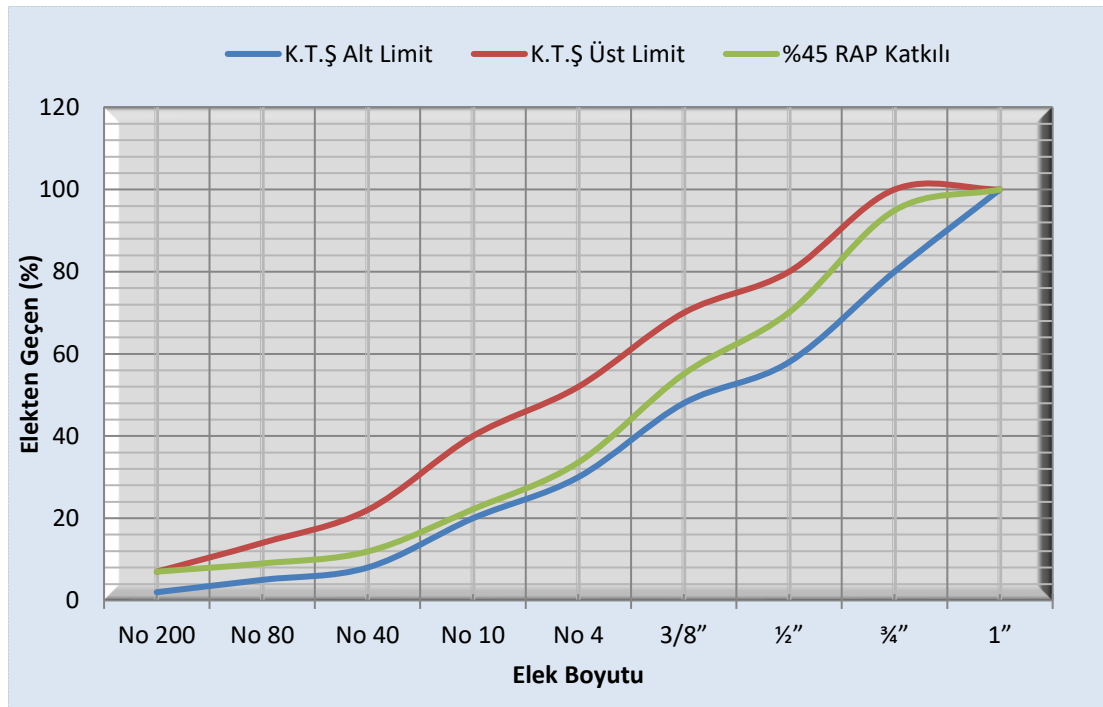
3.3.4.4 %45 RAP katkıli karışım tasarımı

RAP malzemesi agregaları ve ocak malzemesi agregalarının belirli oranları ile yapılan %45 RAP katkıli karışım tasarımının, KTŞ binder tabakası kriterlerine göre belirlenen granülometri değerleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Çizelge % 45 RAP Katkıli karışım granülometrisi.

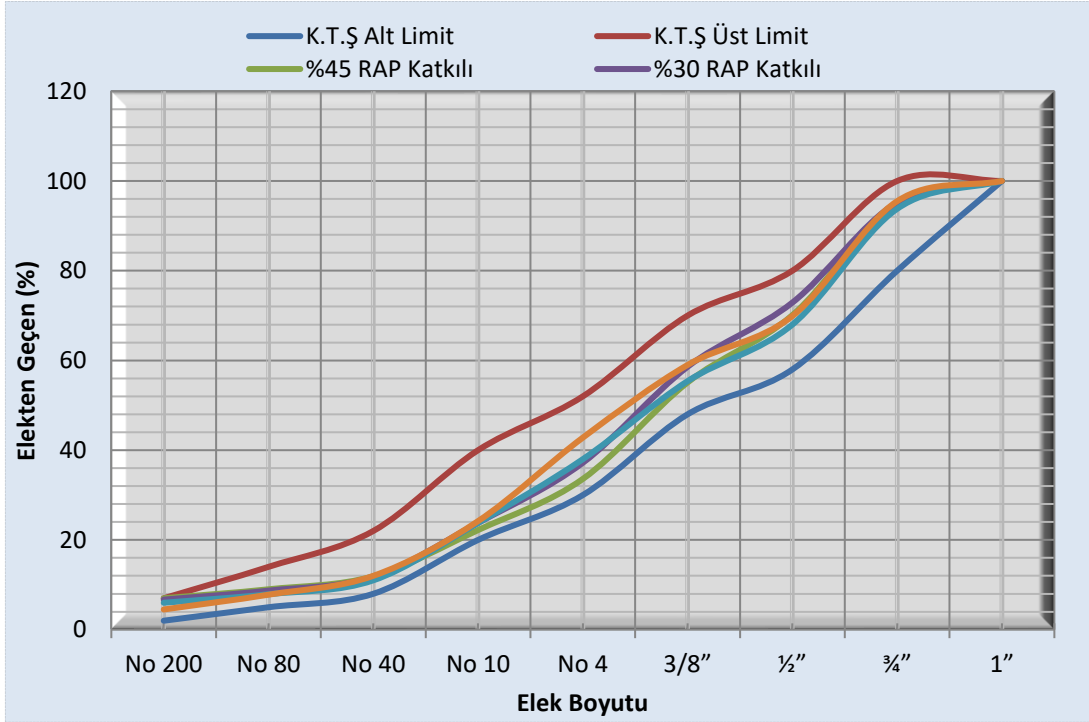
Elek No	Karışım	Şartname
1”	100,0	100-100
¾”	94,9	80-100
½”	70,1	58-80
3/8”	55,1	48-70
No 4	33,6	30-52
No 10	22,2	20-40
No 40	11,9	8-22
No 80	9,0	5-14
No 200	7,0	2-7

Çizelge 3.7’de görülmekte olan %45 RAP katkıli numunenin karışım granülometrisinin KTŞ standartlarına uygunluğu Şekil 3.8’de grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : % 45 RAP katkıli karışım granülometri grafiği.

RAP Katkısız, %15 RAP Katkılı, %30 RAP Katkılı ve %45 RAP Katkılı karışım granülometrelerinin bir arada verildiği Şekil 3.9’da, tüm karışım granülometrinin KTŞ standartlarına uygun olduğu ve birbirine yakın oldukları görülmüştür.



Şekil 3.9 : Tüm karışımlara ait granülometri grafiği.

3.3.5 Asfalt Beton Numunelerinin Hazırlanması

Karışım numunelerinde kullanılacak olan agrega granülometrisi belirlenmiş olup, karışımlarda kullanılacak olan optimum bitüm oranının tesbit edilmesi gerekmektedir.

Bu oran için ABD Asfalt Enstitüsü tarafından, hava boşluğu şartname değer aralığının ortalamasına denk gelen hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı değerinin seçilmesi tavsiye edilmektedir. Bu bitüm içeriğinde hesaplanan değerler gerekli kriterleri sağlıyor ise optimum bitüm oranı olarak seçilebilecektir [38].

KTŞ asfalt betonu tasarım kriterleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Optimum bitüm oranını belirlemek için %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5 ve %6 ve %6,5 bitüm oranlarında numuneler tasarlanmış ve her numuneden 3’er adet olmak üzere 7 farklı bitüm oranında 21 adet numune oluşturulmuştur. Her bitüm oranı için karışıma ait boşluk, agregalar arası boşluk, asfaltla dolu boşluk, akma ve stabilite değerleri belirlenerek grafik haline getirilmiştir. %5 boşluk oranına tekabül eden bitüm yüzdesi optimum bitüm yüzdesi olarak belirlenmiştir. Agregalar arası boşluk, asfaltla dolu boşluk, akma ve stabilite değerleri de, optimum bitüm oranına denk gelen değerlerdir.

Çizelge 3.8 : KTŞ asfalt betonu tasarım kriterleri [41].

Özellikler	Binder		Deney Standardı
	Min	Maks	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi (kg)	750	-	TS EN 12697-34
Boşluk (%)	4	6	TS EN 12697-8
Asfaltla Dolu Boşluk (%)	60	75	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk VMA (%)	13	15	TS EN 12697-8
Akma (mm)	2	4	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	
Bitüm (%)	3,5	6,5	TS EN 12697-1

Kullanılan bitüm 50/70 penetrasyonlu olduğundan dolayı KTŞ gereğince bitüm sıcaklığı 145-165 °C arasında ve agregas sıcaklığı 150-165 °C arasında olmasına dikkat edilmiştir.

3.3.5.1 Ocak malzemelerinin büyük elekte ayrılması

Tasarımı belirlenen numuneleri oluşturmak amacıyla ocak malzemeleri büyük elek vasıtasıyla elenmiş ve tüm eleklerle ait agregalar ayrı ayrı tepsilere konulmuştur. Malzemeler yıkandıktan sonra etüvde kurutulmuştur.

3.3.5.2 Agregaların tartılması

Toplam agregas ağırlığı 1150 gr olan numuneler RAP Katkısız, %15 RAP Katkılı, %30 RAP Katkılı ve %45 RAP Katkılı numuneler olarak, belirlenen tasarımlara göre hazırlanmıştır. Her bir RAP karışımı için, optimum bitüm içeriğini belirlemek amacıyla farklı bitüm oranlarında (%3,5- %4,0- %4,5- %5,0- %5,5-%6,0-%6,5) üçer numune hazırlanmıştır. Bu miktarlarda numuneleri oluşturacak agregalar ile RAP malzemesi, karışım tasarımında belirlenen miktarlara göre tartılarak karıştırılmış ve etüve konulmuştur.

3.3.5.3 Bitüm ve agreganın karıştırılması

1150 gr olarak oluşturulan RAP ve agregas karışımları 175°C sıcaklıkta, bitüm ise 135-140 °C sıcaklıkta etüvde ısıtılmıştır. Karışım tasarımlarında belirlenen toplam bitüm miktarından, RAP malzemesinden gelen bitüm miktarı çıkarılarak gereken bitüm

miktarı hesaplanmıştır. Etüvden çıkarılan RAP ve agreg a karışımına, hesaplanan bitüm miktarı ilave edilerek bitüm tamamen agreg a yüzeyini kaplayıncaya kadar karıştırılmıştır. Karışım sıcaklığı tertometre ile sürekli ölçülerek kontrol edilmiştir.

3.3.5.4 Briketlerin sıkıştırılması

Marshall tokmağı kalıbının alt yüzeyine filtre kağıdı konularak, ısıtılmış spatula ile 15 defa kalıp çeperleri boyunca ve 10 defa kalıp içinden şişlenmiştir. Asphalt İnstitut e MS-2 el kitabına göre Marshall tokmağı vasıtasıyla, numunenin alt ve üst yüzeyine 145 °C sıcaklıkta ağır trafik koşullarını temsil edecek şekilde 75'er darbe vurularak numuneler oluşturulmuştur. Briketler gece boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin sıkıştırma işleminin yapıldığı Marshall Tokmağı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Deney numunelerinin sıkıştırıldığı Marshall Tokmağı.

3.3.5.5 Numunelerin boşluk ve yoğunluk değerlerinin bulunması

Ocaktan gelen ve RAP malzemesinden elde edilen kaba agreg a, ince agreg a ve filler malzemesine özgül ağırlık deneyleri yapılarak sonuçlar Çizelge 3.9'da listelenmiştir.

Çizelge 3.9 : Ocak ve RAP agregaları özgül ağırlıkları.

Malzeme	Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)
Kaba Agregası Özgül Ağırlığı (G_k)	2,710
İnce Agregası Özgül Ağırlığı (G_i)	2,699
Filler Özgül Ağırlığı (G_f)	2,701
RAP Kaba Agregası Özgül Ağırlığı (G_k)	2,713
RAP İnce Agregası Özgül Ağırlığı (G_i)	2,702
RAP Filler Özgül Ağırlığı (G_f)	2,702

Oluşturulan numuneler önce hassas terazi ile havada tartılmış, daha sonra su dolu kaba konularak yaklaşık 2 saat kadar suda bekletilmiş ve böylece tüm boşlukların su ile dolu olması sağlanmıştır. Suda bekletilen numuneler suyun içinde iken Şekil 3.11’de görüldüğü gibi hassas terazi ile tartılmış ve sudaki ağırlığı ölçülmüştür. Daha sonra yan yüzeyleri kuru bez ile silinerek havada tekrar tartılmış ve doygun kuru yüzey ağırlığı bulunmuştur.



Şekil 3.11 : Deney numunelerinin tartım işlemleri.

Havadaki ağırlığı, sudaki ağırlığı ve doymun kuru yüzey ağırlığı bilinen briket numunelerinin, aşağıdaki formüller kullanılarak hacim özgül ağırlık, maksimum teorik özgül ağırlık, boşluk, agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk değerleri bulunmuş ve Çizelge 3.11, Çizelge 3.12, Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14’te listelenmiştir.

Briket numunesinin hacmi:

$$V = B - C \quad (3.4)$$

V : Hacim

B : Doymun kuru yüzey ağırlığı

C : Sudaki ağırlık

Karışımın hacim özgül ağırlığı:

$$D_p = \frac{A}{V} \quad (3.5)$$

A :Briket numunesinin havadaki ağırlığı

V : Briket numunesinin hacmi

Briket numunesinin maksimum teorik özgül ağırlığı:

$$D_T = \frac{(100 + W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3.6)$$

W_a :Bitüm yüzdesi

G_{ef} :Agrega karışımı efektif özgül ağırlığı

G_b :Bitüm özgül ağırlığı

Briket numunesinin boşluk yüzdesi:

$$V_H = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (3.7)$$

D_T : Briket numunesinin maksimum teorik özgül ağırlığı

D_p :Briket numunesinin hacim özgül ağırlığı

Briket numunesinin agregalar arası boşluk yüzdesi:

$$VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}} \quad (3.8)$$

G_{sb} :Agrega karışımı hacim özgül ağırlığı

Briket numunesinin asfaltla dolu boşluk yüzdesi:

$$VFA = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (3.9)$$

Agrega karışımı hacim özgül ağırlığı:

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{i\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}} \quad (3.10)$$

$K\%$: Kaba agreg a yüzdesi

G_k : Kaba agreg a özgül ağırlığı

$i\%$: İnce agreg a yüzdesi

G_i : İnce agreg a özgül ağırlığı

$F\%$: Filler yüzdesi

G_f : Filler özgül ağırlığı

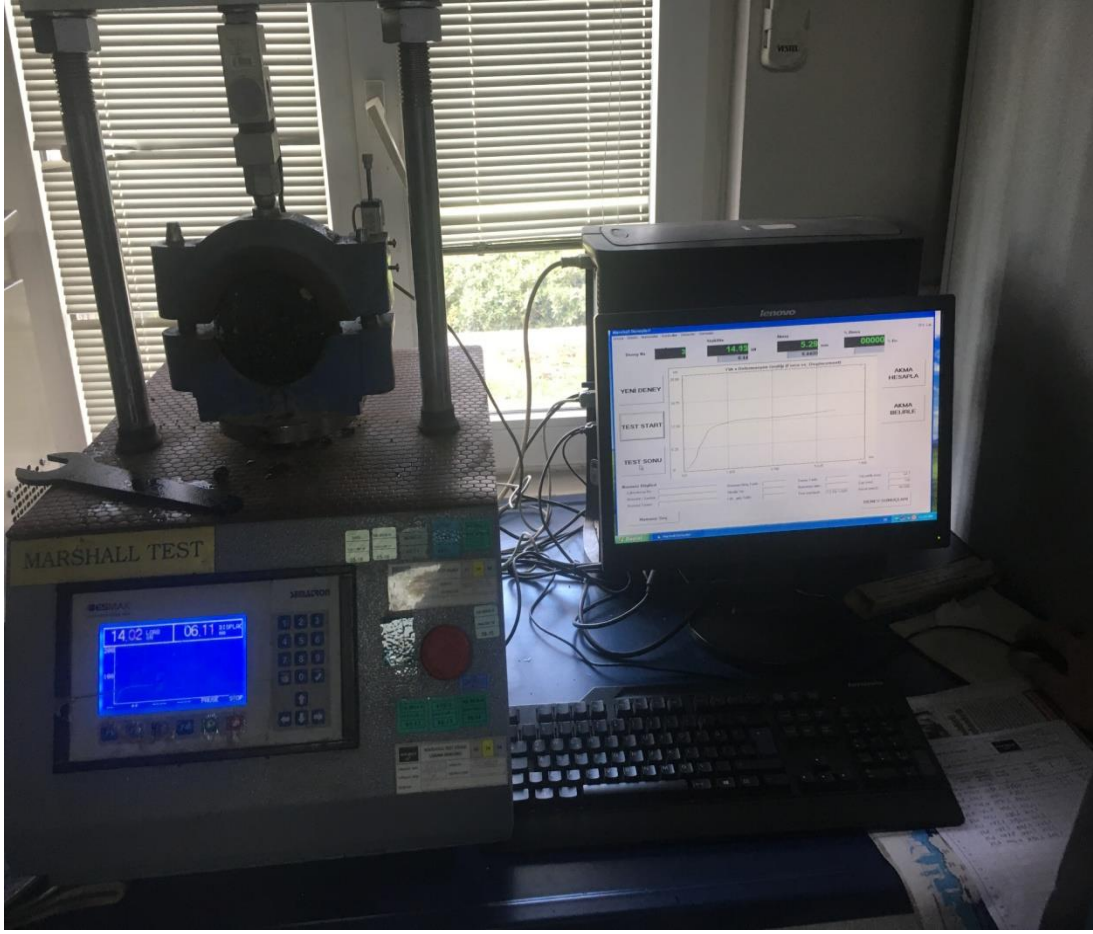
3.3.5.6 Marshall test cihazı ile stabilite-akma tayini

Marshall test cihazında numuneler Şekil 3.12'deki gibi silindirik başlıklar arasında yerleştirilir ve dakikada 51 mm (2 inç) sabit yükleme hızı ile kuvvet uygulanır. Deney sırasında başlıkların kaymasını engellemek için iki adet yön verici çelik çubuk bulunur. Kalibresi yapılmış yük halkası tarafından test numunesine kuvvet uygulanır [38].

Teste başlamadan numuneler 30-40 dakika önce en az 150 mm (6 inç) derinliğinde ve bir termostat ile 60°C sabit sıcaklıkta su banyosunda bekletilmelidir. Su banyosu için kullanılan haznenin delikli bir üst tabanı olmalı ve numuneler su yüksekliğinin en altından 50 mm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmelidir. Stabilite ve akma testi, numunenin su banyosundan çıkarıldıktan sonra toplam 30 saniye içerisinde tamamlanması gerekmektedir [38].

Numuneler akma ve stabilite deneyine başlamadan önce 60 °C sıcaklıkta 50 dakika süre ile bekletilmiştir. Test başlıklarının yüzeyleri iyice temizlenmiş ve cihaz hazır olduğunda numuneler su banyosundan çıkarılarak havlu ile yüzeyleri temizlenmiştir. Sudan çıkarılan ve yüzeyi kurulan numune 30 saniye içerisinde yük halkası arasına

sabitlenerek yükleme yapılmıştır. Marshall test cihazında numunelerin akma ve stabilite ölçümleri görünümü Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Marshall test cihazında numunelerin akma ve stabilite ölçümü.

Marshall otomatik kayıt cihazı kırılma anındaki maksimum yükü ölçmektedir. Kırılma anında ekrandan okunan maksimum yük (kg) değeri stabilite değeri, düşey yer değişime değeri de (mm) akma değeri olarak belirlenmiştir.

Stabilite okuması yükseklikleri 63,5 mm olan numuneler için doğru sonuç vermektedir. Bu yüzden, farklı boyuttaki numuneler için düzeltme faktörleri kullanılması gerekmektedir [37].

Tüm numunelere stabilite-akma testi yapılmıştır. Tüm karışımlara ait bitüm yüzdesi, hacim özgül ağırlığı, maksimum teorik özgül ağırlığı, boşluk yüzdesi, agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA), akma ve düzeltilmiş stabilite değerleri Çizelge 3.10, Çizelge 3.11, Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 : Katkısız numuneye ait marshall deney sonuçları.

Briket No	Bitüm (%)	Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Maks. Teorik Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Agregalar Arası Boşluk (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilité (kg)
1	3,5	2,423					3,29	1105
2	3,5	2,42		6,3	13,61	53,71	3,27	1104
3	3,5	2,414	2,582				3,1	1127
Ortalama		2,419					3,22	1112
4	4	2,445					3,67	1138
5	4	2,434	2,563	4,89	13,37	63,39	3,72	1279
6	4	2,433					3,5	1192
Ortalama		2,438					3,63	1203
7	4,5	2,455					4,11	1238
8	4,5	2,447	2,545	3,73	13,35	72,03	4,18	1198
9	4,5	2,447					4,22	1244
Ortalama		2,45					4,17	1227
10	5	2,479					4,45	1204
11	5	2,462	2,525	2,44	13,22	81,53	4,31	1175
12	5	2,455					4,53	1152
		2,465					4,43	1177
13	5,5	2,465					4,79	1136
14	5,5	2,473	2,517	1,54	13,43	88,53	4,81	1122
15	5,5	2,475					4,63	1114
Ortalama		2,471					4,74	1024
16	6	2,476					4,97	1080
17	6	2,48	2,493	0,71	13,7	94,83	4,86	1107
18	6	2,469					4,99	1058
Ortalama		2,475					4,94	993
19	6,5	2,473					5,17	1003
20	6,5	2,456	2,488	0,62	14,6	95,76	4,39	986
21	6,5	2,453					5,17	1006
Ortalama		2,461					4,91	998

Çizelge 3.11 : %15 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.

Briket No	Bitüm (%)	Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Maks. Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk (%)	Agregalar Arası Boşluk (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilitate (kg)
1	3,5	2,41					3,23	1191
2	3,5	2,411					3,49	1217
3	3,5	2,415	2,581	6,55	13,88	52,81	3,42	1205
	Ortalama	2,412					3,38	1204
4	4	2,424					3,02	1206
5	4	2,427					3,72	1143
6	4	2,42	2,562	5,41	13,88	60,99	3,95	1210
	Ortalama	2,424					3,56	1186
7	4,5	2,435					3,46	1265
8	4,5	2,436					4,02	1184
9	4,5	2,438	2,544	4,25	13,85	69,31	5	1273
	Ortalama	2,436					4,16	1240
10	5	2,451					4,22	1187
11	5	2,448					4,16	1189
12	5	2,444	2,522	3,12	13,86	77,49	4,6	1167
	Ortalama	2,448					4,33	1181
13	5,5	2,464					4,43	1067
14	5,5	2,464					4,81	1146
15	5,5	2,46	2,516	1,85	13,74	86,51	4,46	1066
	Ortalama	2,462					4,56	1093
16	6	2,474					4,89	1096
17	6	2,469					4,98	1069
18	6	2,465	2,497	0,9	13,9	93,52	5,22	964
	Ortalama	2,469					5,03	1043
19	6,5	2,477					5,29	868
20	6,5	2,475					5,12	905
21	6,5	2,465	2,478	0,12	14,21	99,18	4,96	946
	Ortalama	2,472					5,12	906

Çizelge 3.12 : %30 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.

Briket No	Bitüm (%)	Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Maks. Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk (%)	Agregalar Arası Boşluk (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilité (kg)
1	3,5	2,398					3,29	1293
2	3,5	2,397					3,45	1184
3	3,5	2,399	2,581	7,07	14,38	50,73	3,5	1280
	Ortalama	2,398					3,41	1252
4	4	2,41					3,02	1130
5	4	2,411					3,72	1117
6	4	2,412	2,562	5,90	14,33	58,83	3,95	1143
	Ortalama	2,411					3,56	1130
7	4,5	2,42					3,77	1192
8	4,5	2,416					3,87	1168
9	4,5	2,419	2,544	4,93	14,48	65,89	3,98	1170
	Ortalama	2,418					3,88	1176
10	5	2,43					4,31	1031
11	5	2,441					4,43	1181
12	5	2,437	2,526	3,57	14,27	74,99	4,86	1124
	Ortalama	2,436					4,53	1112
13	5,5	2,463					5,1	1093
14	5,5	2,454					5,31	1032
15	5,5	2,461	2,509	1,98	13,87	85,70	4,46	1066
	Ortalama	2,459					4,96	1064
16	6	2,459					5,15	989
17	6	2,454					5,26	1054
18	6	2,46	2,492	1,36	14,32	90,42	5,63	964
	Ortalama	2,458					5,35	1002
19	6,5	2,434					5,57	844
20	6,5	2,434					5,19	876
21	6,5	2,42	2,475	1,84	15,7	88,25	5,94	862
	Ortalama	2,429					5,56	861

Çizelge 3.13 : %45 RAP katkılı numuneye ait marshall deney sonuçları.

Briket No	Bitüm (%)	Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Maks. Teorik Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Agregalar Arası Boşluk (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilité (kg)
1	3,5	2,404					3,29	1139
2	3,5	2,408					3,45	1056
3	3,5	2,407	2,581	6,74	14,05	52,12	3,35	1079
Ortalama		2,407					3,36	1091
4	4	2,415					4,1	1072
5	4	2,418					4	1131
6	4	2,416	2,562	5,68	14,16	59,86	3,95	1056
Ortalama		2,416					4,02	1086
7	4,5	2,424					4,12	1174
8	4,5	2,422					4,26	1162
9	4,5	2,423	2,544	4,74	14,33	66,89	4,42	1070
Ortalama		2,423					4,27	1135
10	5	2,441					5,22	1069
11	5	4,445					4,96	1106
12	5	2,431	2,53	3,45	14,18	75,68	5,62	1022
Ortalama		2,439					5,27	1066
13	5,5	2,459					6,07	987
14	5,5	2,457					5,86	1067
15	5,5	2,455	2,508	2,07	13,96	85,16	5,33	1004
Ortalama		2,457					5,75	1019
16	6	2,465					5,75	1020
17	6	2,45					5,85	950
18	6	2,46	2,491	1,34	14,32	90,62	6,09	914
Ortalama		2,458					5,9	961
19	6,5	2,463					6,39	745
20	6,5	2,453					6,19	802
21	6,5	2,434	2,463	1,01	15,00	93,28	5,47	787
Ortalama		2,45					6,02	778

3.3.5.7 Optimum bitüm oranı tayini

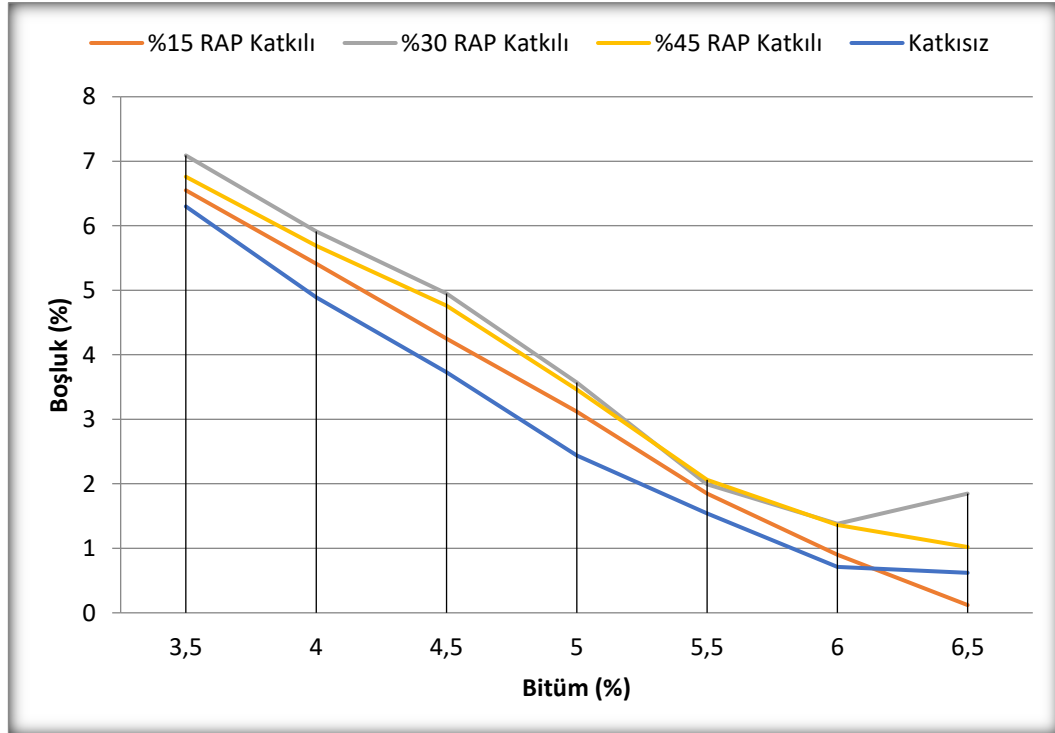
Optimum bitüm oranı tayini için, elde edilen boşluk yüzdesi ve bitüm yüzdesi değerleri Şekil 3.13’de grafik haline getirilerek, her bir RAP karışımı için % 5 boşluk oranına denk gelen bitüm oranları optimum bitüm oranı olarak seçilmiştir. Bu orana denk gelen agregalar arası boşluk (VMA), asfalt ile dolu boşluk (VFA), akma ve stabilite değerleri bulunarak sırasıyla Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de grafik halinde gösterilmiştir.

3.3.5.8 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Hava boşlukları, sıkıştırılmış asfalt betonu içerisinde bitüm ile kaplı agregalar parçaları arasında oluşmuş olan hava tanecikleridir [37].

Şekil 3.13’de bitüm oranı arttıkça tüm karışımlarda boşluk oranlarının da azaldığı görülmektedir. Artan bitüm miktarı ile beraber boşlukların bitüm ile dolarak boşluk yüzdesinin azalması beklenen bir durumdur.

Asfalt kaplamanın durabilite özelliği, içeriğindeki hava boşluğuyla doğrudan ilişkilidir. Hava boşluğu oranının fazla olması, servis süresince asfalt betonu içerisine hava ve suyun girerek kaplamanın erken bozulmasına neden olur. Hava boşluğunun az olması bitümün kaplama yüzeyine çıkarak kusmasına sebep olur [37].



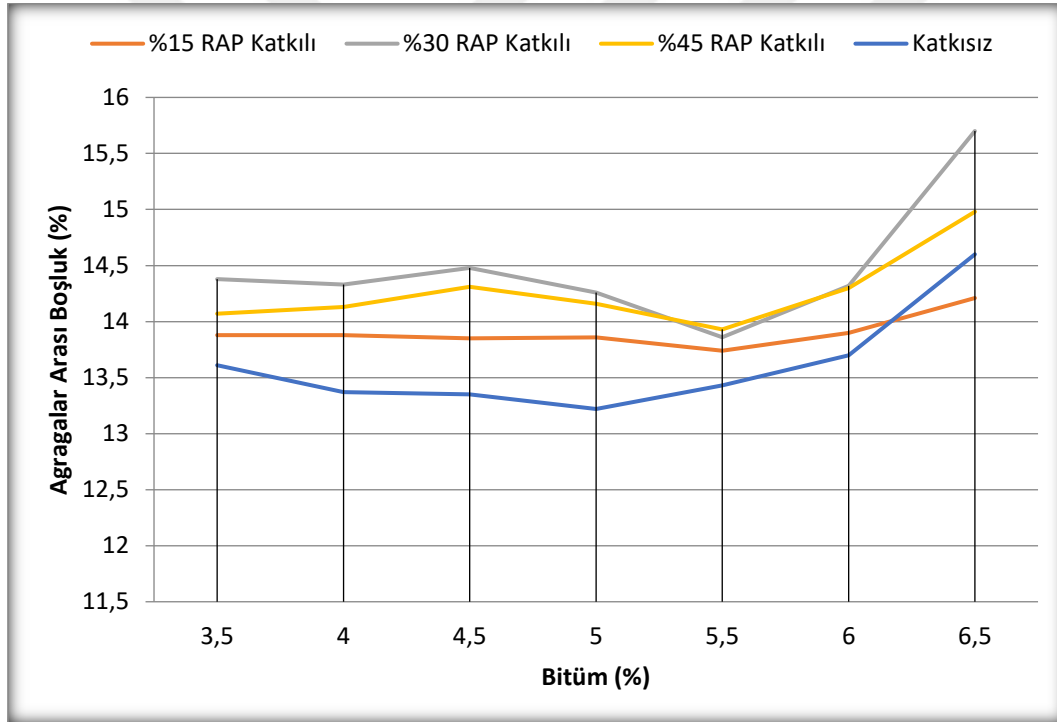
Şekil 3.13 : Karışımlara ait bitüm oranı – boşluk yüzdesi grafiği.

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), sıkışmış karışımdaki agrega daneleri arasındaki boşluğun hacmidir. Yani bitüm ve hava boşluğu hacminin toplamının karışımın toplam hacmine oranının bir ölçüsüdür [37].

VMA değeri, bitüm miktarı arttıkça daha iyi bir sıkışma nedeniyle önce azalır, fakat bir noktadan sonra yükselmeye başlar. Bu durum bitüm tanelerinin arttıkça birbirini itmeye başlamasından kaynaklanmaktadır [38].

Şekil 3.14'te görüldüğü gibi bitüm oranı optimum bitüm yüzdelere kadar arttıkça daha iyi bir sıkışma alındığı için VMA değeri azalmış ve daha sonra artan bitüm oranı ile yükselme eğilimine girmiştir.

Şekil 3.14'te optimum bitüm oranına karşılık gelen agregalar arası boşluk yüzdesi değeri okunarak Çizelge 3.14'te gösterilmiştir.

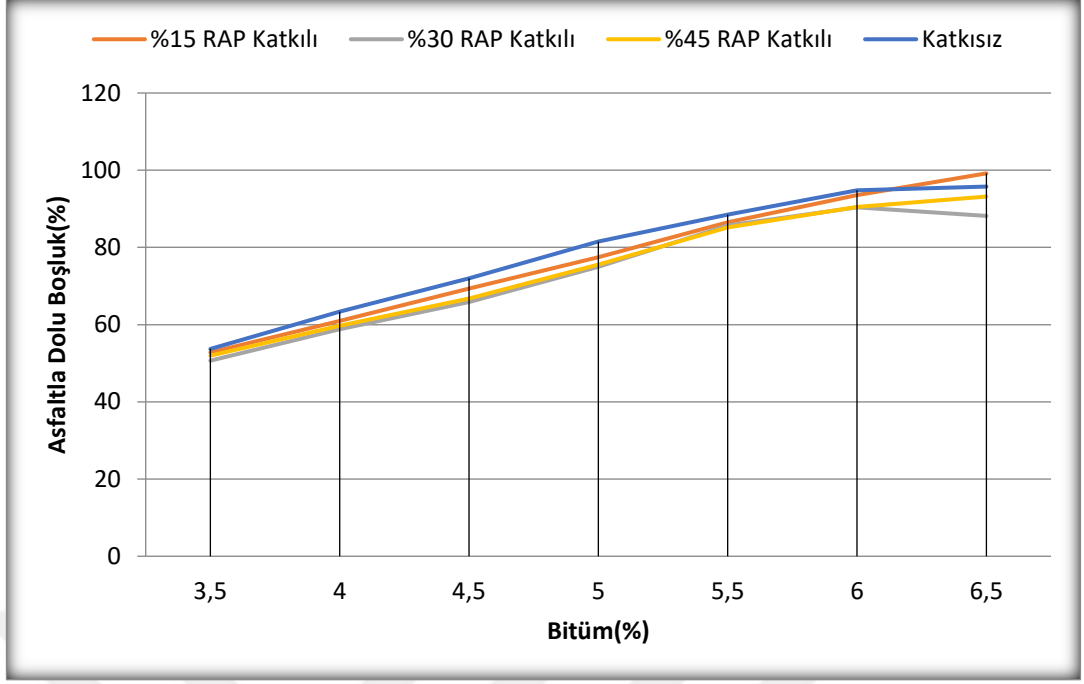


Şekil 3.14 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi grafiği.

Asfaltla dolu boşluk (VFA) değeri, bitüm miktarının artmasıyla artış gösterir çünkü VMA içindeki boşluklar sürekli olarak bitüm ile dolmaktadır [38].

Şekil 3.15'te bitüm oranının artması ile birlikte tüm karışımlarda asfaltla dolu boşluk yüzdesinin arttığı görülmüştür.

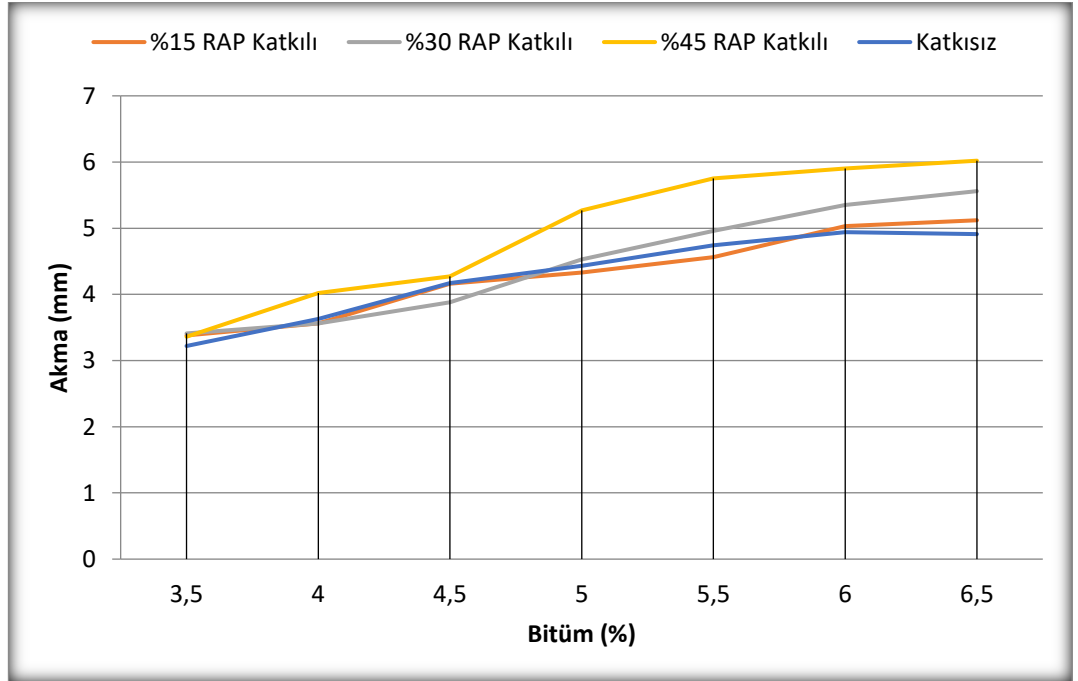
Şekil 3.15'te optimum bitüm oranına karşılık gelen agregalar arası boşluk yüzdesi değeri okunarak Çizelge 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi grafiği.

Akma değeri, bitümlü sıcak kaplamaların trafik yükleri altında esneklik ve plastiklik yönünden davranışını ölçen bir parametredir. Sıkışmış karışımın iç sürtünme açısı ile akma değeri arasında ters orantı vardır [42].

Şekil 3.16’da tüm karışımlarda artan bitüm miktarı ile birlikte beklenen bir durum olarak akmanın da arttığı görülmüştür.



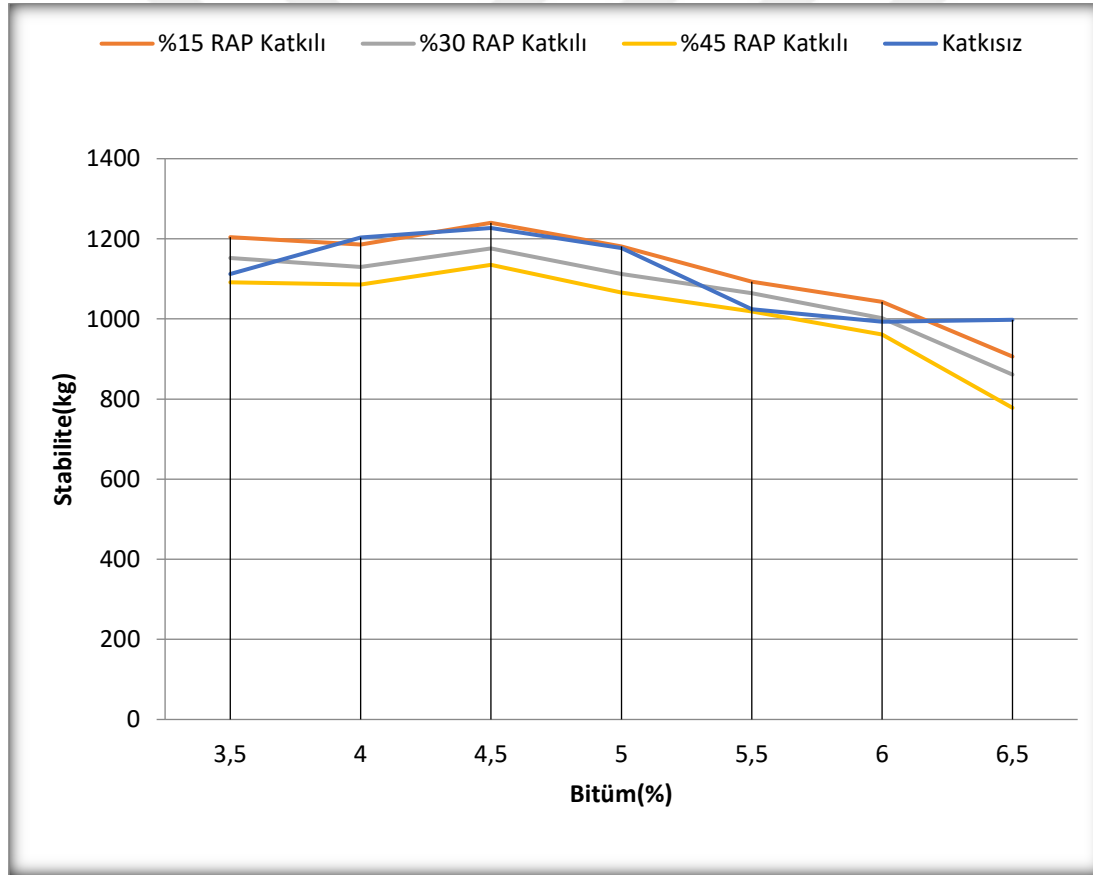
Şekil 3.16 : Karışımlara ait Bitüm Oranı-Akma grafiği.

Şekil 3.17’de tüm karışımlara ait stabilite değeri artan bitüm miktarıyla birlikte genel olarak azalma eğilimindedir.

Ancak, tüm karışımlarda stabilite miktarındaki azalmanın optimum bitüm oranı olan %4-%4,5 aralığından sonra daha fazla görülmektedir.

Bitüm miktarı optimuma kadar arttıkça boşluklar dolduğu için stabilitede artış gözlenirken, bitüm miktarının daha fazla artması içsel sürtünmeyi azalttığı için stabilitede düşüş görüldüğü düşünülebilir.

Bitümlü sıcak karışımlarda stabilitenin çok düşük veya çok yüksek olması istenen bir durum değildir. Stabilitenin çok düşük olması trafik yükleri altında deformasyonu arttırırken, çok yüksek olması ise kaplamanın gerilmeye maruz kaldığında esnek davranamayıp çatlamasına sebep olacaktır [39].



Şekil 3.17 : Karışımlara ait bitüm oranı-stabilite grafiği.

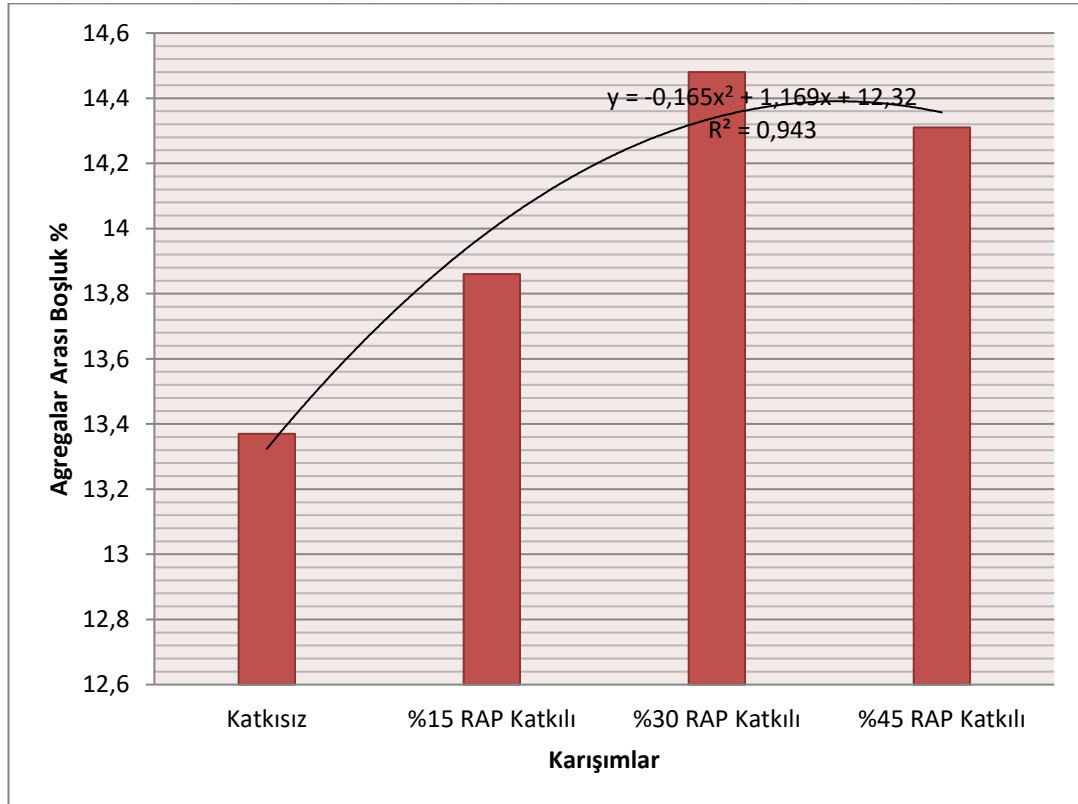
Optimum bitüm oranına denk gelen agregalar arası boşluk yüzdesi, asfaltla dolu boşluk yüzdesi, akma ve stabilite değerleri okunarak Çizelge 3.14’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.14 : Optimum bitüm yüzdesindeki numunelerin marshall değerleri.

Karışım	Bitüm Oranı (%)	Boşluk (%)	Agr. Arası Boşluk Yüzdesi	Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilité (kg)
Şartname	3,5-6,5	4-6	13-15	60-75	2-4	Min 750
RAP Katkısız	4	5	13,37	63,39	3,63	1203
%15 RAP Katkılı	4,2	5	13,86	64,31	3,56	1207
%30 RAP Katkılı	4,5	5	14,48	65,83	3,88	1176
%45 RAP Katkılı	4,5	5	14,31	66,75	4,27	1135

KTŞ'de agregalar arası boşluk yüzdesinin %13 ile %15 değerleri arasında olması gerektiği belirtilmektedir. Tüm karışımların bu oranı sağladığı görülmektedir (Şekil 3.18).

RAP malzemesi oranının artmasıyla agregalar arası boşluk yüzdesinin artmasının, yaşlanmış bitüm oranının sıkışmaya olan negatif etkisinden kaynaklandığı düşünülebilir.

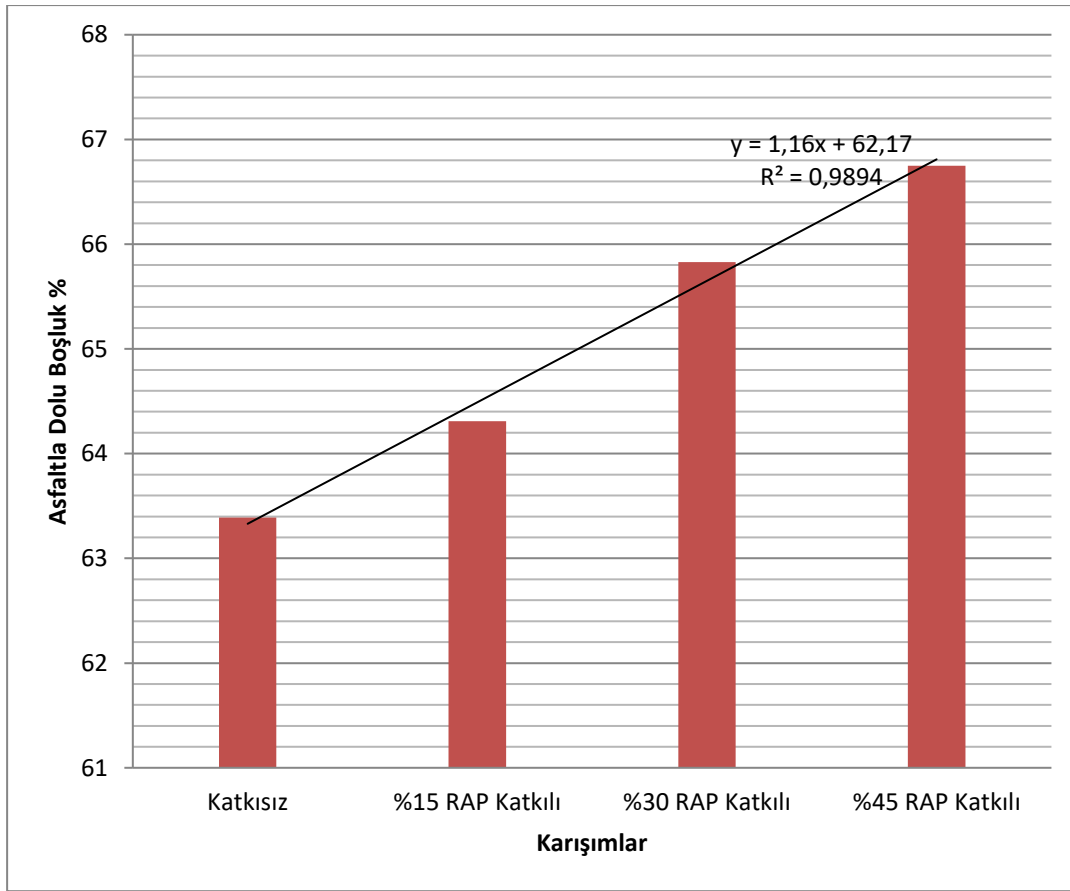


Şekil 3.18 : Karışımlara ait agregalar arası boşluk yüzdesi grafiği.

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA), sıkışmış karışımdaki agrega daneleri arasındaki bitümün kapladığı boşluğu ifade etmektedir. Karışımdaki VFA ölçüsünün amacı, agregalar arasındaki boşluğu dengeleyerek maksimum boşluğu sağlamak ve bitüm içeriğini sınırlamaktır [37].

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi için KTŞ’de %60-75 aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Tüm karışımların bu oranı sağladığı Şekil 3.19’da görülmektedir.

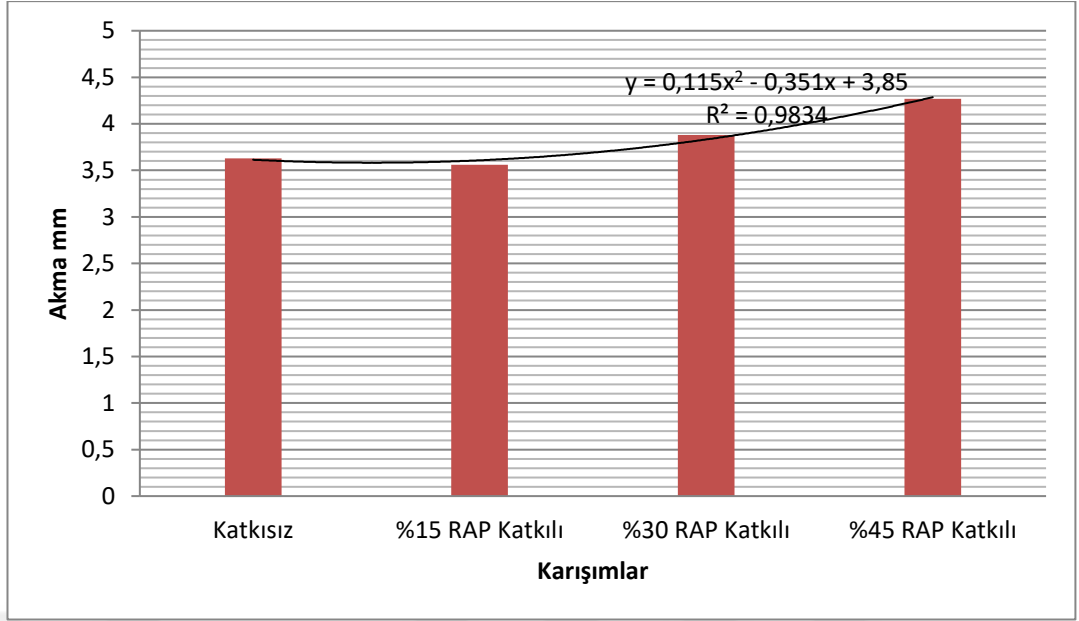
Karışımında RAP yüzdesinin artmasıyla asfaltla dolu boşluk yüzdesinin artmasının sebebi olarak, eski bitüm miktarının artmasının sıkışmayı azaltması olarak düşünülebilir.



Şekil 3.19 : Karışımlara ait Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi grafiği.

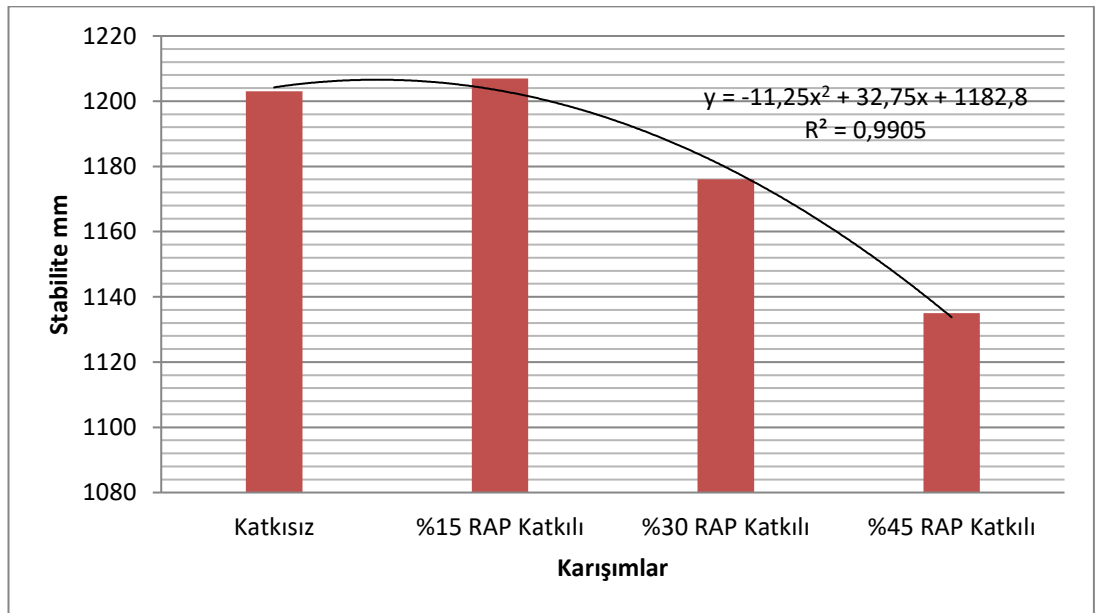
Akma değerinin şartname değerinin üzerinde olması karışımın çok plastik ya da akışkan olduğunu, altında olması ise karışımın kırılgan olduğunu göstermektedir [38].

Şekil 3.20’de ilk üç karışımın şartname limitlerini sağladığı görülmektedir. %45 RAP katkılı karışımın akma değerinin, maksimum şartame limiti olan 4 mm değerinin biraz üstünde olması, bu karışımdaki optimum bitüm oranının yüksek olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.20 : Karışımlara ait Akma grafiği.

Bitümlü sıcak karışımlarda stabilite terimi, trafik yükü altında kaplamalarda oluşabilecek deformasyonlara karşı gösterilen direncin yani mukavemetin bir ölçüsüdür. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi düşük olursa trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyon fazla olur. KTŞ'ye göre stabilite değerinin 750 kg değerinden büyük olması gerekmektedir. Şekil 3.21'de tüm karışımlar için bu değer sağlanmakta olduğu görülmüştür. Karışımdaki RAP oranı arttıkça stabilite değerinin %15 RAP karışımına kadar arttığı, %30 ve %45 RAP katkı oranlarında genel olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.21 : Karışımlara ait Stabilite grafiği.

3.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (DÇM) deneyi, bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulmadan kaynaklanan çekme gerilmelerini modellemek için kullanılır.

Bu deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır.

Silindirik asfalt numunelerine yüke dik doğrultuda sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır. Deney aşamasında bozulma, uygulanan yükte bir artışın olmadığı yada en büyük yükün olduğu zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanabildiği en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır. Deney aşamasında yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmeler de hesaplanır [6].

3.4.1 Numunelerin hazırlanması

Her bir karışım tipinden 6 adet, 100 mm çapında silindirik deney numuneleri 2x35 vuruş (35 darbe alta, 35 dabe üste) ile Marshall tokmağında sıkıştırılarak oluşturulmuştur. Bu numuneler 3 adeti normal (kuru), 3 adeti koşullandırılmış (ıslak) numuneler olarak üretilerek, Marshall yönteminde olduğu gibi yükseklik, havadaki ağırlık ve sudaki ağırlık değerleri ölçülmüştür.

3.4.2 Kuru numune işlemleri

Kuru numuneler deney zamanına kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Deneyden önce 25°C etüvde iki saat bekletildikten sonra Marshall test cihazında eksenel yükleme uygulanarak kırılma anındaki maksimum yük okunmuş ve dolaylı çekme mukavemeti belirlenmiştir.

3.4.3 Koşullu numune işlemleri

Islak numuneler, numunelerin üst yüzeyinin en az 2 cm üzerinde bir seviyeye kadar 20 °C sıcaklıkta içilebilir su ile doldurulmuş vakum kabının içindeki delikli rafın üzerine yerleştirilmiştir.

Dakika içerisinde 6,7 kPa değerinde mutlak basınç elde etmek için kademeli olarak vakum uygulanmıştır. 30 dakika boyunca vakuma devam edildi, daha sonra atmosfer basıncının yavaş yavaş vakum kabına girmesine izin verilmiştir. Numuneler 30 dakika daha suda bekletilmiştir.

Daha sonra ıslak numuneler Şekil 3.22’de görüldüğü gibi 72 saat süre boyunca 40 °C’deki su banyosunda bekletildikten sonra çıkarılarak 25 °C’lik suda 2 saat bekletilmiştir. Hemen sonrasında Şekil 3.23’te görülen Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye uygulanarak kırılma anındaki maksimum yük okunmuş ve dolaylı çekme mukavemeti belirlenmiştir.



Şekil 3.22 : Koşullu numunelerin suda bekletilmesi görünümü.

3.4.4 Sonuçların hesaplanması

P=Kırılma anındaki yük

t=Numune kalınlığı

D=Numune çapı

olmak üzere, kuru ve ıslak numuneler için çekme mukavemeti aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Dolaylı Çekme Mukavemeti (kpa)} = 2 \times P / (\pi \times t \times D) \quad (3.11)$$

Koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri, kuru numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri ile oranlanarak dolaylı çekme mukavemeti oranları formül 3.12 ile bulunmuştur.

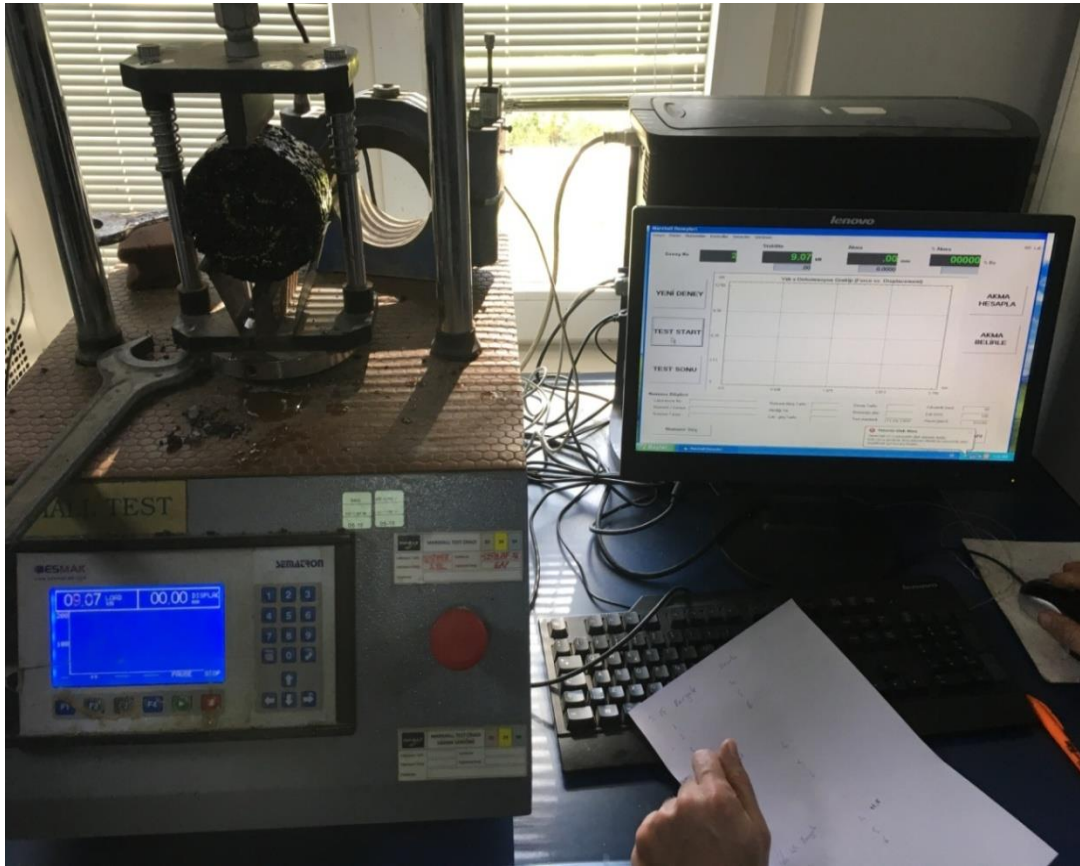
Dolaylı çekme mukavemeti oranı değeri bitümlü sıcak kaplamaların suya hassasiyetinin tesbiti için kullanılan bir değerdir [15].

$$\text{DÇM Oranı} = \text{DÇM}_{\text{ıslak}} / \text{DÇM}_{\text{kuru}} \quad (3.12)$$

$\text{DÇM}_{\text{ıslak}}$ = Islak numunelerin dolaylı çekme mukavemeti

DÇM_{kuru} = Kuru numunelerin dolaylı çekme mukavemeti

Şekil 3.23'te Marshall test cihazında numunelere eksenel yük uygulanması gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : Marshall test cihazında numunelere eksenel yük uygulanması.

Kırılma anındaki yük okunduktan sonra formül 3.11 ve 3.12 ile tüm numunelere ait Dolaylı Çekme Mukavemeti ve Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı değerleri bulunarak Çizelge 3.15, Çizelge 3.16, Çizelge 3.17, Çizelge 3.18'da gösterilmiştir.

Her bir numunenin Marshall deneylerinde olduğu gibi çap, yükseklik, havadaki ağırlık, sudaki ağırlık değerleri ile hacim ve boşluk değerleri yine Çizelge 3.15, Çizelge 3.16, Çizelge 3.17, Çizelge 3.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.15 : RAP katkısız numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.

Numune No	Kuru Numuneler			Koşullu Numuneler		
	1	2	3	4	5	6
Numune Çapı (mm)	101,5	101,5	101,6	101,3	101,4	101,4
Numune Yüks. (mm)	65,5	65,6	66,5	68,0	66,5	66
Havadaki Ağırlık (gr)	1193,3	1182,6	1188,9	1191,3	1195,6	1184,7
Havadaki Ağırlık (dky)(gr)	1201,5	1192,3	1201,4	1206,4	1208,2	1195,2
Sudaki Ağırlık (gr)	695,9	693,1	696,7	700,1	697,2	690,7
Hacim (cm ³)	505,6	499,2	504,7	506,3	511	504,5
Boşluk %	7,7	7,4	7,9	8,0	8,5	8,8
Yük (kN)	13,29	13,37	12,46	11,68	13,33	13,05
Dolaylı Çekme Muk. (kPa)	1273,9	1279,5	1174,9	1080,62	1259,5	1229,8
Ortalama Çekme Muk (kPa)		1243,2			1189,6	
Dolaylı Çekme Muk. Oranı			95,68			

Çizelge 3.16 : %15 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.

Numune No	Kuru Numuneler			Koşullu Numuneler		
	1	2	3	4	5	6
Numune Çapı (mm)	101,5	101,5	101,6	101,6	101,6	101,5
Numune Yüks. (mm)	64,1	65,5	64,3	66,0	64,5	64,5
Havadaki Ağırlık (gr)	1193,5	1196,8	1194,5	1191,9	1197,2	1197
Havadaki Ağırlık (dky) (gr)	1195,6	1203,5	1199	1200,0	1201,9	1200,6
Sudaki Ağırlık (gr)	698,6	704,2	700,8	702,2	702,5	702,5
Hacim (gr/cm ³)	497	499,3	498,2	498	499,4	498,1
Boşluk %	6,3	6,4	6,4	6,6	6,4	6,2
Yük (kN)	12,07	12,61	12,21	11,85	11,61	12,36
Dolaylı Çekme Muk. (kPa)	1181,6	1208,1	1190,5	1125,6	1128,4	1202,5
Ortalama Çekme		1193,4			1152,2	
Dolaylı Çekme Muk.Oranı			96,5			

Çizelge 3.17 : %30 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.

Numune No	Kuru Numuneler			Koşullu Numuneler		
	1	2	3	4	5	6
Numune Çapı (mm)	101,5	101,5	101,6	101,6	101,6	101,6
Numune Yüks. (mm)	65,5	65,7	67,4	68,3	67,0	66,3
Havadaki Ağr. (gr)	1194,3	1196	1196,9	1196,6	1193,6	1191,1
Havadaki Ağrlık (dky)	1200,1	1199,9	1206,3	1209,3	1202,5	1199,7
Sudaki Ağırlık (gr)	700,1	693,8	699,8	699,7	698,9	696,8
Hacim (gr/cm ³)	500	506,1	506,5	509,6	503,6	502,9
Boşluk %	6,8	7,8	7,8	8,3	7,5	7,5
Yük (kN)	12,95	11,62	12,59	10,27	12,79	11,10
Dolaylı Çekme Mukavemeti (kPa)	1240,9	1109,8	1171,5	942,7	1196,5	1050,7
Ortalama Çekme Muk.		1176,2			1063,3	
Dolaylı Çekme Muk. Oranı			90,4			

Çizelge 3.18 : %45 RAP katkılı numunelerin DÇM Deneyi sonuçları.

Numune No	Kuru Numuneler			Koşullu Numuneler		
	1	2	3	4	5	6
Numune Çapı (mm)	101,5	101,5	101,6	101,6	101,6	101,5
Numune Yüks. (mm)	68,1	67,6	65,7	68,5	66,8	66,0
Havadaki Ağr. (gr)	1187,8	1193,9	1189,7	1186,9	1192,2	1193,1
Havadaki Ağırlık (dky)	1198,6	1200,6	1193,7	1196,2	1200,1	1198,1
Sudaki Ağırlık (gr)	695,7	697,2	693,6	696,6	697,4	697,4
Hacim (gr/cm ³)	502,9	203,4	500,1	499,6	502,7	500,7
Boşluk %	7,8	7,4	7,1	7,3	7,4	7,0
Yük (kN)	12,20	12,57	13,12	11,47	11,57	11,47
Dolaylı Çekme Mukavemeti (kPa)	1124,1	1166,8	1252,1	1050,1	1086,7	1090,9
Ortalama Çekme Mukavemeti (kPa)		1180,8			1075,7	
Dolaylı Çekme Muk. Oranı			91,1			

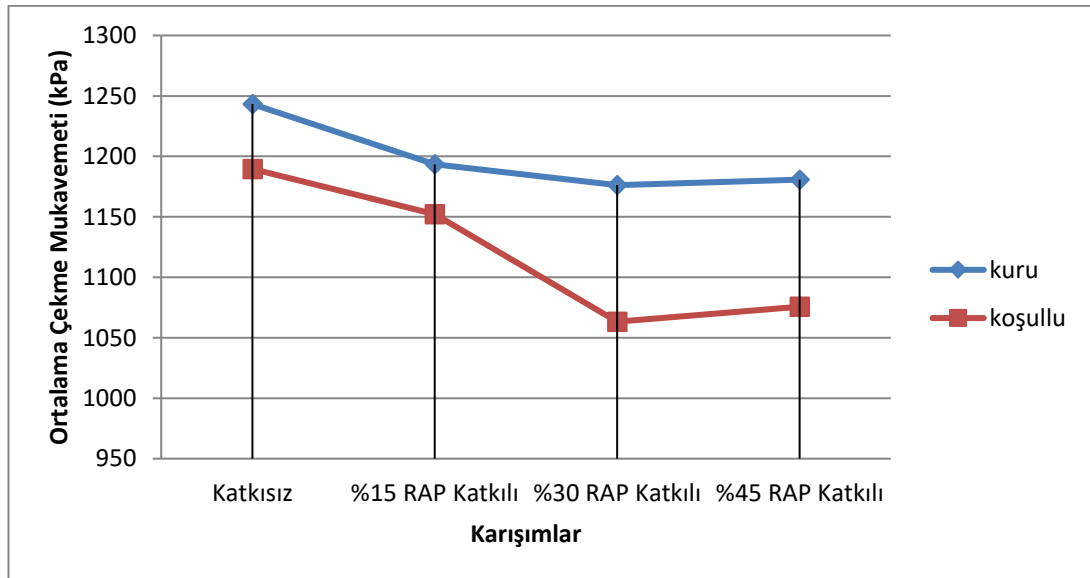
3.4.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde belirtilen standart değerler Çizelge 3.19'da gösterilmiştir. Buna göre; dolaylı (indirekt) çekme mukavemeti değeri minimum $5 \text{ kg/cm}^2=490 \text{ kPa}$ olması gerekirken, kuru ve ıslak numunelerin dolaylı çekme mukavemeti oranının minimum değerinin % 80 olması gerekmektedir.

Çizelge 3.19 : Binder tabakası DÇM Deneyi şartname değerleri [41].

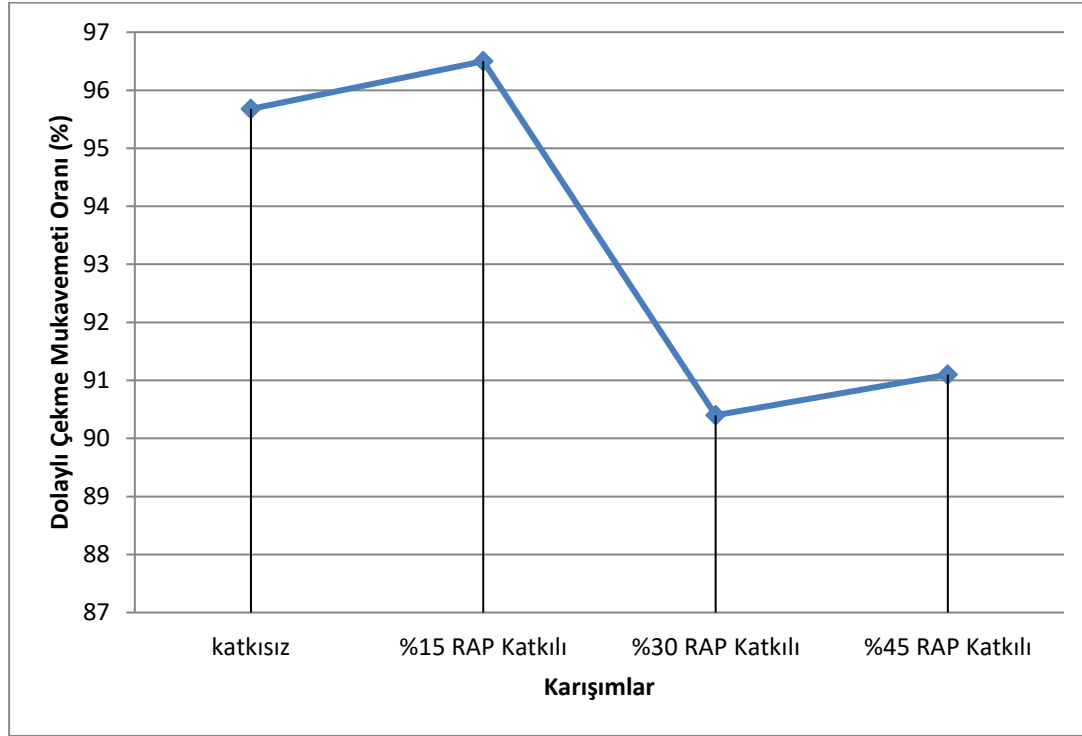
Özellikler	Binder	Deney Standartı
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti kg/cm^2	5,0	AASHTO T 283
İndirekt Çekme Mukavemeti Oranı, %, min.	80	

Şekil 3.24'te tüm karışımlara ait kuru ve ıslak numunelerin dolaylı çekme mukavemetlerinin şartname minimum değeri olan 490 değerinden büyük olduğu görülmektedir. Karışımlardaki RAP oranı arttıkça dolaylı çekme mukavemeti değerleri azalmıştır.



Şekil 3.24 : Kuru ve koşullu numunelerin Ortalama Çekme Mukavemeti değerleri.

Şekil 3.25'te her bir karışımın DÇM oranlarının şartname değeri olan minimum 80 değerinden büyük olduğu ve kriterleri sağladığı görülmektedir.



Şekil 3.25 : Karışımlara ait Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı grafiği.

3.5 Tekerlek İzi Deneyi

Tekerlek izi deneyi, bitümlü sıcak karışımların yük altında deformasyona karşı hassasiyetini ölçmek için uygulanan bir deney yöntemidir.

Bu deney için tekerlek izi deney cihazı, kumpas, asfalt kesme makinası, terazi ve master aletleri kullanılmıştır.

Tekerlek izi testi için Hamburg modeli tekerlek izi cihazı kullanılmıştır. Hamburg modeli tekerlek izi cihazı mikser, kompaktör ve test makinesi olmak üzere üç kısımdan oluşur.

Şekil 3.26'da gösterilmiş olan test makinesinde 70 kg yük uygulayabilen iki adet tekerlek bulunur. Tekerleklerle takılan lastiğin kalınlığı 50 mm ve çapı 200 mm' dir. Bu tekerleklerin numunelere uyguladığı yük sonucunda, test makinesine ait techizatlar ile numunedeki tekerlek izi, geçiş sayısı ve sıcaklık değerleri sürekli olarak ölçülür.

Ölçülen değerler test cihazına ait bilgisayar yazılımı ile otomatik olarak grafik haline getirilir.



Şekil 3.26 : Hamburg modeli tekerlek izi test makinesi görünümü.

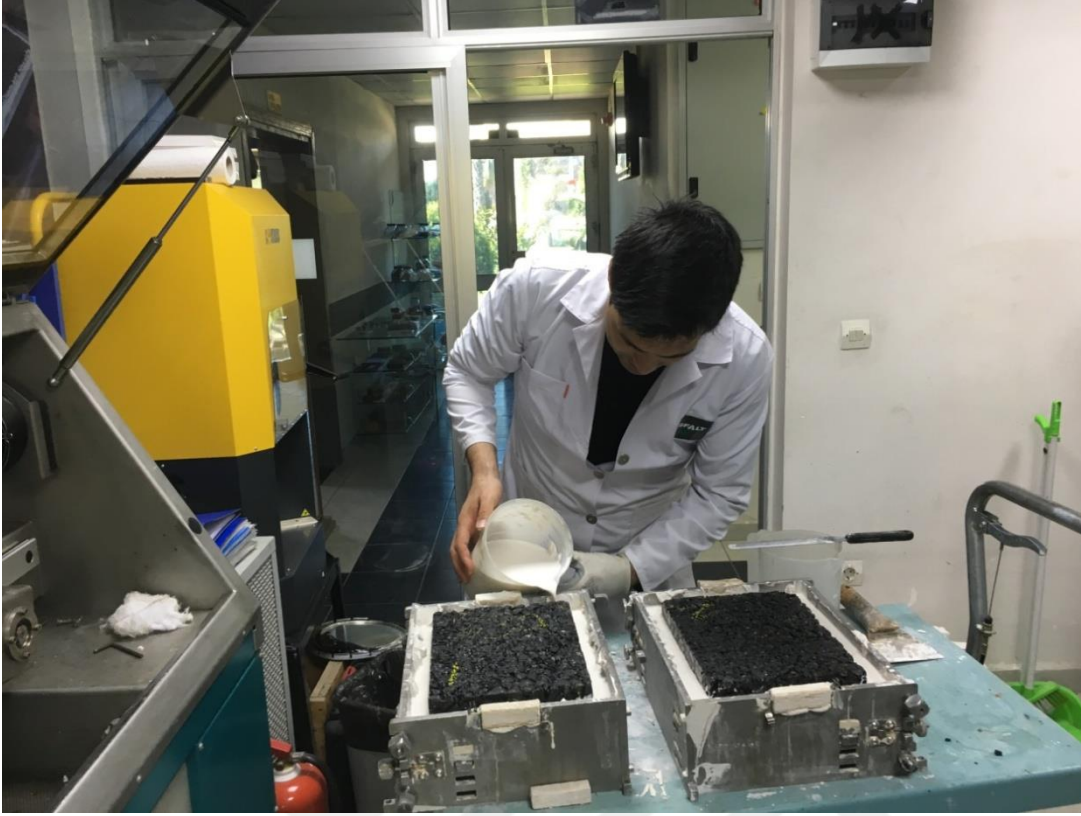
3.5.1 Numunelerin hazırlanması

Etüvde ısıtılan agregası ile bitüm, optimum bitüm oranlarında mikserde karıştırılarak bitümlü sıcak karışım haline getirilmiştir. Oluşturulan karışım hassas terazi ile tartılarak numune oluşturulmak üzere kalıba konulmuş ve daha sonra kompaktör cihazında numune sıkıştırılmıştır.

Oluşturulan numune, tekerlek izi kalıbı içinde hareket edemeyecek şekilde kenarları alçı ile doldurularak Şekil 3.27’de görüldüğü gibi kalıba sabitlenmiştir.

Her bir RAP karışım oranı için 260x410x60 mm ebatlarında 2’şer adet numune hazırlanmıştır. Numuneler deney öncesinde 48 saat süreyle 20-25 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra 60 °C sıcaklıkta 4 saat koşullandırma işlemi yapılmıştır.

Oluşturulan bu numuneler tekerlek izi deney cihazına yerleştirilerek deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27 : Deney numunelerinin kalıba yerleştirilmesi.

3.5.2 Sonuçların Hesaplanması

Tekerlek izi deney cihazından WTS_{hava} (Whell-tracking slope), WTS_{lineer} (Whell tracking slope), tekerlek izi derinliği ve tekerlek izi oturma yüzdesi değerleri okunmuştur. Bu veriler aşağıdaki gibi tanımlanır:

WTS_{hava} : Tekerlek izi deney cihazında yüklü bir tekerleğin havadaki tekrarlanan geçişlerine göre zamanla arttığı ortalama değer olarak hesaplanan tekerlek izi eğimi (mm/1000 devir).

WTS_{lineer} : Tekerlek izi grafiğinin lineer kısmının eğimi (mm/1000 devir)

Tekerlek izi derinliği: Yüklü bir tekerleğin tekrarlanan geçişleri sonucunda test numunesinin kalınlığında milimetre cinsinde azalma miktarı (mm).

Tekerlek izi oturma yüzdesi: Tekerlek izi derinliğinin numune kalınlığına göre yüzdesi

Yük devri: yüklü tekerleğin iki geçişi (dışa ve içe doğru hareketi) olarak tarif edilir.

1000 yük devri başına mm cinsinden tekerlek izi eğimi aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$WTS_{hava} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.13)$$

Burada;

WTS_{hava} : Tekerlek izi deney cihazında yüklü bir tekerleğin havadaki tekrarlanan geçişlerine göre zamanla arttığı ortalama değer olarak hesaplanan tekerlek izi eğimi (mm/1000 devir).

D5000: 5000 yük devrinden sonraki mm cinsinden tekerlek izi derinliği.

D10000: 10000 yük devrinden sonraki mm cinsinden tekerlek izi derinliği.

Tekerlek izi deneyi sonuçlarına ait şartname limitleri Çizelge 3.20’de gösterilmiştir. Bu limitler trafik yüklerine doğrudan maruz kalan aşınma tabakası için hazırlanmıştır. Binder tabakası aşınma tabakasının hemen altında bulunur ve trafik yüklerinden aşınma tabakasına göre bir miktar daha az etkilenir. Aşınma tabakası için sağlanan limitler binder tabakası için fazlasıyla sağlanmış olur. Bu sebeple binder tabakası için yapılan bu çalışmada, tekerlek izi deney sonuçlarının değerlendirilmesi, şartnamede verilen aşınma tabakası limitlerine göre yapılmıştır.

Buna göre, 10.000 devir yani 20.000 geçişte 5 cm kalınlığındaki numunedeki oturma miktarı en fazla 4,50 mm olabileceği belirtilmektedir. Deney numunelerinin yükseklikleri farklılık gösterdiğinden dolayı, tekerlek izi oturması yüzde olarak hesaplanacak olursa; $4,50/50 = \%5,67$ maksimum tekerlek izi oturmasına şartnamelerin izin verdiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.20 : KTŞ asfalt betonu tasarım kriterleri.

Özellikler	Aşınma TİP-1, TİP-2	Deney Standardı
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C’de, 10 cm kalınlığında numune), maks. (%)	8	TS EN 12697-22 (Büyük Ebatlı Cihazla : LCPC
Tekerlek İzinde Oturma (10.000 devirde (20.000 geçişte), 60 °C’de, 5 cm kalınlığında numune), (RDort) maks. (mm)	4,5	TS EN 12697-22 (Küçük Ebatlı Cihazla : HWT, Metot B, Havada)

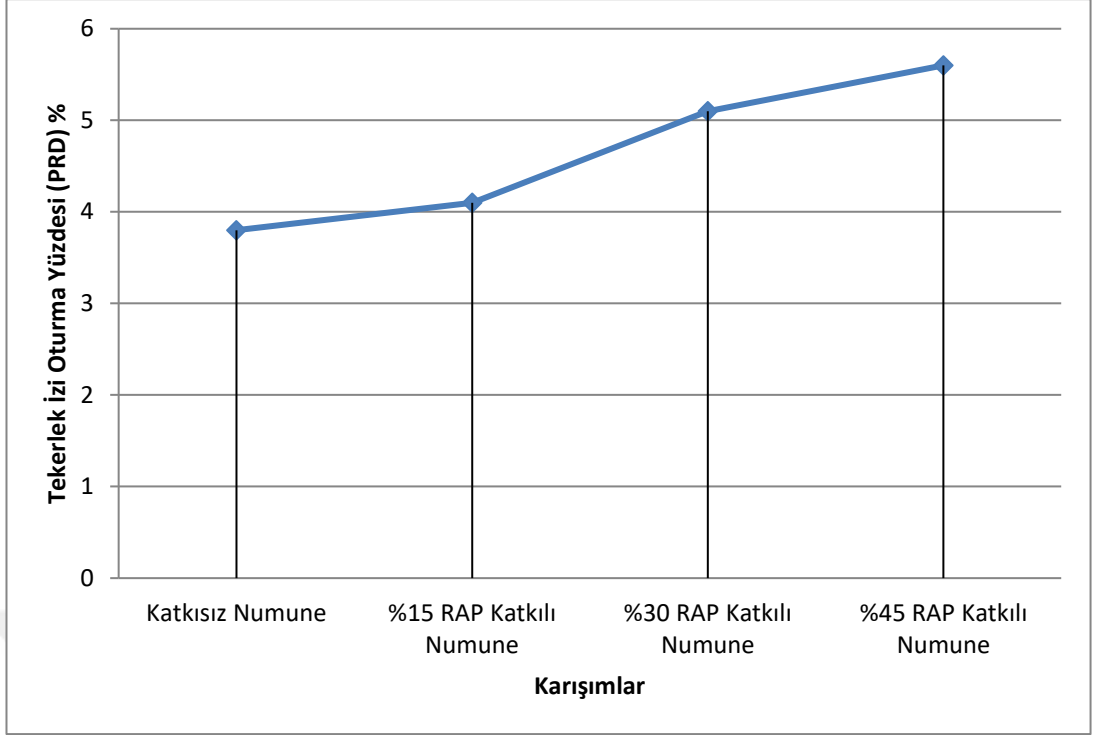
Deney sonucu test cihazından alınan veriler Çizelge 3.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.21 : Tekerlek İzi Deneyi sonuçları.

Karışım	Numuneler	Tekerlek İzi Eğimi (mm/1000 devir)	Tekerlek İzi Eğimi Lineer kısım (mm/1000devir)	Tekerlek İzi Derinliği (mm)	Tekerlek İzi Derinliği (%)
Katkısız Karışım	Sağ Numune	0,05	0,04	2,4	3,8
	Sol Numune	0,06	0,05	2,5	3,9
	Ortalama Değer	0,05	0,04	2,5	3,8
%15 RAP Katkılı Karışım	Sağ Numune	0,08	0,06	2,7	4,47
	Sol Numune	0,08	0,08	2,33	3,72
	Ortalama Değer	0,08	0,07	2,51	4,1
%30 RAP Katkılı Karışım	Sağ Numune	0,07	0,08	3,1	4,9
	Sol Numune	0,08	0,07	3,4	5,3
	Ortalama Değer	0,07	0,07	3,3	5,1
%45 RAP Katkılı Karışım	Sağ Numune	0,06	0,08	3,62	5,87
	Sol Numune	0,07	0,11	3,37	5,25
	Ortalama Değer	0,07	0,09	3,5	5,6

3.5.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

- Tüm karışımlara ait tekerlek izi oturma yüzdeleri Şekil3.28’de görüldüğü gibi şartname maksimum sınır değeri olan % 5,7 değerinin altında kalmıştır.
- %45 RAP katkılı karışımın tekerlek izi oturma yüzdesi değeri % 5,6 değeri ile sınır değere oldukça yakındır.
- Karışımlarda kullanılan RAP oranı arttıkça tekerlek izi oturma yüzdesi artmıştır.
- Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan RAP oranı arttıkça asfalt betonu kaplamanın trafik yükleri altında deformasyonunun artacağı görülmüştür.



Şekil 3.28 : Karışımlara ait Tekerlek İzi Oturma Yüzdesi (PRD) grafiği.

3.6 Karışımların Maliyet Hesabı

Maliyet çalışması RAP katkısız, %15 RAP katkılı, %30 RAP katkılı ve %45 RAP katkılı bitümlü sıcak karışımların 1 ton üretimi için yapılmıştır. Serme ve sıkıştırma işlemleri tüm karışımlarda ortak olduğu için serme ve sıkıştırma maliyetleri hesaplanmamıştır.

Maliyet hesabında Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından her yıl yayınlanan “ 2019 yılı Yol, Köprü, Tüneli Bitümlü Kaplamalar Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi ” birim fiyatları kullanılmıştır.

TÜPRAŞ A.Ş. İzmit Rafinerisi’ nin 26.10.2019 tarihli B 50/70 penetrasyonlu bitüm fiyatı kullanılmıştır.

Karışımlarda kullanılan agreganın İstanbul ili sınırları içerisinde ortalama 25 km mesafeden, bitümün ise TÜPRAŞ A.Ş. İzmit Rafinerisi’nden yaklaşık 100 km mesafeden nakledildiği kabul edilmiştir. Bu mesafeler kullanılarak nakliyeler için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan KGM/ 06.006/K “ Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması (ton) (10.000 km’ den fazla)” pozu kullanılmıştır. Agreganın 1 tonunun nakliyesi için poz tarifinde yer alan aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$F=1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) \times A \quad (3.14)$$

K:Taşıt katsayı (ÇŞB tarafından her yıl yayınlanır)

M:Mesafe

A:Zorluk katsayısı (Şehir içi şantiyelerde 1 kabul edilir)

Buna göre agreganın 1 tonunun 25 km mesafeye nakliye maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$F=1,25 \times 330(0,0007 \times 25 + 0,01) \times 1 = 11,34 \text{ TL/ton}$$

Bitümün bir tonunun 100 km mesafeye nakliye maliyeti aynı formül ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$F=1,25 \times 330 \times (0,0007 \times 100 + 0,01) \times 1 = 33 \text{ TL/ton}$$

Hesaplanan nakliye birim fiyatları kullanılarak karışımların maliyet analizleri Çizelge 3.22, Çizelge 3.23, Çizege 3.24 ve Çizelge 3.25'te verilmiştir.

Çizelge 3.22 : RAP katkısız karışımın 1 tonu için maliyet analizi.

Poz No	Tanım	Birim	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
KGM/4103	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 25 Mm. (1"), 19 Mm. (3/4") Ve 12,5 Mm. (1/2") Lik Agregası Hazırlanması	Ton	0,3552	26,94	9,57
KGM/4105/B	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 12.5 Mm (1/2") Ve 9,5 Mm (3/8") Lik Agregası Hazırlanması	Ton	0,2208	29,08	6,42
KGM/4107	Ocak Taşından Kırılmış Ve Elenmiş 4,75 Mm (No.4) Ve Daha Küçük Agregası Hazırlanması	Ton	0,3840	30,76	11,81
KGM/4436	Büyük Plent Ünitesi İle Karışım Hazırlanması	Ton	1,000	35,18	35,18
Bitüm	50/70 Penetrasyonlu Bitüm	Ton	0,040	1.650,00	66,00
Agrega Nakliyesi	Agrega Nakli 25 Km	Ton	0,960	11,34	10,89
Bitüm Nakliyesi	Bitüm Nakli 100 Km	Ton	0,040	33,00	1,32
Toplam:					141,19

Çizelge 3.23 : %15 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.

Poz No	Tanım	Biri m	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
KGM/4103	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 25 Mm. (1"), 19 Mm. (3/4") Ve 12,5 Mm. (1/2") Lik Agrega Hazırlanması	Ton	0,2850	26,94	7,68
KGM/4105/B	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 12.5 Mm (1/2") Ve 9,5 Mm (3/8") Lik Agrega Hazırlanması	Ton	0,1630	29,08	4,74
KGM/4107	Ocak Taşından Kırılmış Ve Elenmiş 4,75 Mm (No.4) Ve Daha Küçük Agrega Hazırlanması	Ton	0,2440	30,76	7,51
RAP Hazırlanması	0-20 Mm. Geri Dönüşüm Mazemesi Hazırlanması	Ton	0,1440	18,75	2,70
KGM/4436	Büyük Plent Ünitesi İle Karışım Hazırlanması	Ton	1,000	35,18	35,18
Bitüm	50/70 Penetrasyonlu Bitüm	Ton	0,0382	1.650,00	63,03
Agrega Nakliyesi	Agrega Nakli 25 Km	Ton	0,6920	11,34	7,85
Bitüm Nakliyesi	Bitüm Nakli 100 Km	Ton	0,0382	33,00	1,26
Toplam:					122,27

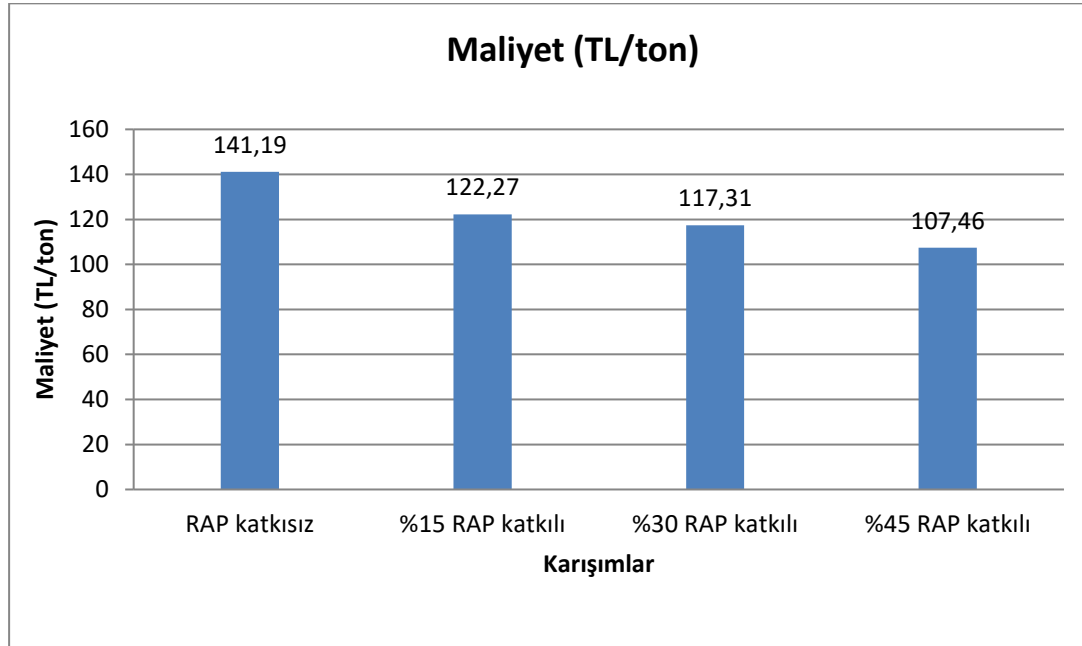
Çizelge 3.24 : %30 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.

Poz No	Tanım	Birim	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
KGM/4103	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 25 Mm. (1"), 19 Mm. (3/4") Ve 12,5 Mm. (1/2") Lik Agrega Hazırlanması	Ton	0,1818	26,94	4,90
KGM/4105/B	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 12.5 Mm (1/2") Ve 9,5 Mm (3/8") Lik Agrega Hazırlanması	Ton	0,1471	29,08	4,28
KGM/4107	Ocak Taşından Kırılmış Ve Elenmiş 4,75 Mm (No.4) Ve Daha Küçük Agrega Hazırlanması	Ton	0,1337	30,76	4,11
RAP Hazırlanması	0-20 Mm. Geri Dönüşüm Mazemesi Hazırlanması	Ton	0,2865	18,75	5,37
KGM/4436	Büyük Plent Ünitesi İle Karışım Hazırlanması	Ton	1,000	35,18	35,18
Bitüm	50/70 Penetrasyonlu Bitüm	Ton	0,0375	1.650,00	61,88
Agrega Nakliyesi	Agrega Nakli 25 Km	Ton	0,463	11,34	5,25
Bitüm Nakliyesi	Bitüm Nakli 100 Km	Ton	0,0375	33,00	1,24
Toplam:					117,31

Çizelge 3.25 : %45 RAP katkılı karışımın 1 tonu için maliyet analizi.

Poz No	Tanım	Biri m	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
KGM/4103	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 25 Mm. (1"), 19 Mm. (3/4") Ve 12,5 Mm. (1/2") Lik Agregası Hazırlanması	Ton	0,1576	26,94	4,25
KGM/4105/B	Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Ve Elenmiş 12.5 Mm (1/2") Ve 9,5 Mm (3/8") Lik Agregası Hazırlanması	Ton	0,0945	29,08	2,75
KGM/4107	Ocak Taşından Kırılmış Ve Elenmiş 4,75 Mm (No.4) Ve Daha Küçük Agregası Hazırlanması	Ton	0,0368	30,76	1,13
RAP Hazırlanması	0-20 Mm. Geri Dönüşüm Mazemesi Hazırlanması	Ton	0,4298	18,75	8,06
KGM/4436	Büyük Plent Ünitesi İle Karışım Hazırlanması	Ton	1,000	35,18	35,18
Bitüm	50/70 Penetrasyonlu Bitüm	Ton	0,0339	1.650,00	55,94
Agrega Nakliyesi	Agrega Nakli 25 Km	Ton	0,2889	11,34	3,28
Bitüm Nakliyesi	Bitüm Nakli 100 Km	Ton	0,0339	33,00	1,12
Toplam:					107,46

Şekil 3.29’da tüm karışımların 1 ton üretim maliyetleri gösterilmiştir. Karışımın kullanılan geri dönüşüm malzemesinin artmasıyla asfalt üretim maliyetleri azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.29 : Karışımların 1 ton üretim maliyetleri.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal kaynaklardan karşılanan ham madde ihtiyacı çevreye zarar vererek ekolojik dengeyi bozmakta ve yüksek maliyetlerinden dolayı ülke ekonomilerine büyük yük getirmektedir. Geri dönüşümü mümkün olan atık malzemeleri yeniden kullanarak, doğal kaynakları korunmuş olur ve ekonomik açıdan kazanımlar elde edilebilir. Bu çalışmada yol bakım, onarım ve yenileme gibi sebeplerle yollardan kazınan asfalt betonu kaplamaların geri dönüşümünü sağlayarak yeniden yol kaplamalarında kullanılması araştırılmıştır. Bu kapsamda kazınmış asfalt betonu kaplama agrega ağırlıklarınca %15, %30 ve % 45 oranlarında yeni karışıma ilave edilerek, kazınmış asfalt kaplama içermeyen karışım ile birlikte dört farklı karışım elde edilmiştir. Tüm karışım numunelerine Marshall Deneyleri, Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyleri ve Tekerlek İzi Deneyleri yapılarak, kazınmış asfalt betonu kaplamaların binder tabakalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tüm deney çalışmaları KTŞ'de belirtilen deney standartlarına uygun olarak yapılmış olup, farklı RAP oranlarındaki karışımlar için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

RAP katkısız numune deney sonuçlarına göre;

Numunelerin Marshall deneyleriyle bulunan agregalar arası boşluk (VMA), asfaltla dolu boşluk (VFA), akma ve stabilite değerleri KTŞ'de binder tabakası için belirtilen standart değerleri sağlamıştır. DÇM deneyi sonucu, dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemeti oranı değerlerinin KTŞ'de belirtilen standartları sağladığı görülmüştür. Tekerlek izi deneyi sonucu bulunan ortalama tekerlek izi derinliği yüzdesi değeri KTŞ'de belirtilen standart değer aralığında kalmıştır.

%15 RAP katkılı numune deney sonuçlarına göre;

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değerleri ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değerleri RAP katkısız numuneye göre bir miktar arttığı (VMA % 0,3; VFA %1,4), akma değerinde azalma (% 1,92) ve stabilite değerinde artma olduğu (% 0,3) gözlenmiştir. Bu artma ve azalmalar küçük değerlerde olup, deney sonuçları KTŞ standartlarına uygundur. DÇM deneyi sonucunda bulunan kuru ve koşullu numunelere

ait dolaylı çekme mukavemeti değerleri KTŞ standartlarına uygundur. DÇM oranı değerleri RAP katkısız numuneye göre küçük bir oranda (%0,8) artmıştır. Buradan % 15 RAP karışım numunelerinin suya hassasiyetinin RAP katkısız numunelere göre hemen hemen aynı değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Tekerlek izi deneyinde, tekerlek izi oturma yüzdelerinde RAP katkısız numunelere göre artış (%7) gözlenmiş olup, bulunan değer KTŞ standartlarına uygundur.

%30 RAP katkılı numune deney sonuçlarına göre;

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değeri RAP katkısız numuneye %3,8 oranında artmış olup, KTŞ standart değer aralığına uygundur. Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değeri artarak % 14,48 olmuş ve KTŞ maksimum sınır değer olan 15 değerine yaklaşmıştır. Akma değeri katkısız ve % 15 RAP katkılı numuneye göre artarak 3,88 mm ölçülmüş ve KTŞ maksimum sınır değeri olan 4 mm değerine yaklaşmıştır. Stabilitate değerinde RAP katkısız numunelere göre küçük bir azalma (%2,2) görünse de, KTŞ minimum standart değeri olan 750 kg değerine göre oldukça iyi durumdadır. DÇM deneyi sonucunda bulunan kuru ve koşullu numunelere ait dolaylı çekme mukavemeti değerleri KTŞ standartlarına uygundur. Dolaylı çekme mukavemeti oranı değerleri RAP katkısız numunelere göre %5,8 oranında ve %15 RAP katkılı numunelere göre %6,7 oranında azalmıştır. Buradan suya hassasiyetinin RAP katkısız ve %15 RAP katkılı numunelere göre arttığı anlaşılmıştır. Bulunan değerler KTŞ standartlarına uygundur. Tekerlek izi deneyinde, tekerlek izi oturma yüzdeleri RAP katkısız numunelere göre bir miktar (%34) artmıştır. Bulunan değer KTŞ standartlarına uygundur.

%45 RAP katkılı numune deney sonuçlarına göre;

Agregalar arası boşluk yüzdesi değerleri ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi değerleri RAP katkısız numuneye göre bir miktar (%7) artmıştır. Akma değeri 4,27 mm olarak KTŞ maksimum sınır değeri olan 4 mm değerini aşmıştır ve şartname standartlarını sağlamamıştır. Stabilitate değeri karışımlar içinde en düşük değer olan 1135 kg ile şartname kriterini sağlamıştır. Dolaylı çekme mukavemeti değeri KTŞ standartlarına uygundur. Dolaylı çekme mukavemeti oranı değerleri RAP katkısız numuneye göre düşük sonuçlar verse de, şartname kriterlerine uygundur. Tekerlek izi deneyinde tekerlek izi oturma yüzdesi 5,6 değeri ile şartname sınır değeri olan 5,7 değerine oldukça yaklaşmıştır. Şartname değerleri aşınma tabakasına ait olduğundan dolayı,

trafik yüklerine aşınma tabakasına nazaran daha az maruz kalan binder tabakası için bu değerin kabul edilebilir bir değer olduğu anlaşılmıştır.

Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde, bitümlü sıcak kaplamalarda geri dönüşüm amacıyla yeni karışıma agrega ağırlıklarınca % 15 oranında RAP eklenmesi, asfaltın performansını küçük miktarlarda etkilemiş ve değerlerin şartname standartlarına uygun olduğu görülmüştür. %30 oranında RAP eklenmesi sonucu agregalar arası boşluk yüzdesi değeri ve akma değeri şartname sınır değerine yaklaşmıştır. Fakat şartname sınırları içerisinde olduğundan dolayı kullanılması uygun görünmektedir. DÇM ve tekerlek izi deneyleri sonucunda %30 RAP katkısının suya hassasiyeti artırdığı ve tekerlek izi oturma yüzdesini arttırdığı görülmüştür. Ancak, bu değerler şartname aralığında kaldığından dolayı kullanılması uygundur. % 45 oranında RAP eklenmesi sonucunda ise karışımın akma değeri 4,27 mm ile şartname değeri olan 4 mm değerini aşmıştır. DÇM deney sonuçları %30 RAP katkılı numunelere göre yaklaşık olarak aynı sonucu vermiş, tekerlek izi oturma yüzdesi şartname maksimum sınır değerine ulaşmıştır. Bu sebeple RAP malzemesinin %45 oranında yeni karışıma ilave edilmesinin, asfalt kaplamanın performansını olumsuz etkileyeceği görülmüştür.

Karışımlarda kullanılan RAP oranı arttıkça genel olarak asfalt betonu kaplamanın performansı düşmüştür. RAP katkılı karışımlar içerisinde en iyi performansı %15 oranı göstermiş olsa da, % 30 oranında RAP malzemesinin binder tabakasında kullanılmasının da uygun olduğu görülmüştür. Yapılan regresyon analizi sonucu binder tabakasında en fazla %35 oranında RAP malzemesi kullanmanın uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Maliyet analizleri sonucunda karışımlarda geri dönüşüm oranı arttıkça asfalt üretim maliyetleri azaldığı görülmüştür.

Bitümlü sıcak kaplamalarda eski asfalt kaplama kullanarak yapılan geri dönüşüm ile ülke ekonomisine kazanç sağlanmaktadır. Atık malzemelerin yeniden kullanılması yeni malzeme ihtiyacını azaltarak doğal kaynakları korumakta ve atık sahaların oluşmasını engelleyerek çevreyi korumaktadır. Ayrıca onarım işlerinde mevcut kaplama üzerine yeni kaplama yapılması yerine geri dönüştürülerek yenilenen yol daha mukavemetli olacak ve tabandaki yansıma çatlakları kaplama üzerinde oluşmayacaktır.

Asfaltta geri dönüşüm, sağladığı ekonomik ve çevresel faydalar sebebiyle ihtiyaçtan öte bir zorunluluk halini almalıdır. Bunun için devlet tarafından gerekli yasal

düzenlemeler yapılmalı, vergi kolaylığı sağlanarak geri dönüşüm teşvik edilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır. Yeni yapılacak bitümlü sıcak kaplamalarda mümkün olan en yüksek geri dönüşüm oranı kullanılmalıdır. Bu çalışmada gençleştirici katkı kullanılmadan %35 oranı civarında geri dönüşüm elde edilmiştir. Gençleştirici katkı kullanılarak daha yüksek oranlarda geri dönüşüm elde edilmesi konusunun farklı bir çalışmada ele alınması faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Akkoç, E.** (2012). *Shingle atıklarının asfalt betonu içerisinde kullanılabilirliği*. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [2] **Asfalt geri kazanımı.** Erişim: 20.09.2019 ,
<http://www.simgemat.com.tr/tr/CevreArge/AsfaltGeriKazanimi>.
- [3] **Yayla, N. (2004).**, Karayolu Mühendisliği, Birsan Yayın Evi, 2004.
- [4] **ASMÜD Türkiye Asfalt Mütahhiti Derneği,** (2006). Türkiye'de Rakamlarla Asfalt, Erişim: 01 Temmuz 2019
<http://www.asmud.org.tr>.
- [5] **Arslan, İ.** (2012) *Farklı çevre şartlarına maruz kalan asfalt betonunun mühendislik özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Düzce.
- [6] **Ilıcalı, M.,** (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt, İstanbul.
- [7] **Kaya, B.** (2009). *Bitümlü sıcak karışımların geri dönüşümü, çevresel etkileri ve maliyet analizi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Türkiye'de Asfalt Endüstrisi.** Erişim: 20 Haziran 2019,
<http://www.asmud.org.tr/asfalt.php?sayfa=60>.
- [9] **Dikicioğlu, A. E.,** *Belediyelerde Yol Üstyapısı Sorunlarına Genel Bakış ve Antalya Örneği*, Erişim: 19 Haziran 2019.
<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11160.pdf>
- [10] **Köfteci, S.** (2017). *Bitümlü sıcak karışımlardan geri dönüşüm yolu ile elde edilen agregaların performanslarının değerlendirilmesi*, (Yüksek Lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- [11] **Ceylan, H.** (2009). *Asfalt Endüstrisi Çevre Kanunu İlişkisi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25 (1-2).
- [12] **Entegre Kirliliğin Önlenmesi ve Kontrolü Direktifi,** (1996). Avrupa Komisyonu,

- [13] **Arapoğlu, A. S.** (2015). *Bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşüm maliyet analizi ve optimum geri kazanım mesafesinin araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [14] **Sönmez, İ.**, *İnşaat atıklarının asfaltta geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması*, [PowerPoint slides]. Erişim <https://www.khl-group.com/events/demolition-conference-turkey/assets/ibrahim-sonmez.pdf>
- [15] **Aksoy, A.**, *Bitüm reolojik yapısının bitümün yaşlanmasına ve kaplamanın performansına olan etkisinin incelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane.
- [16] **M. C. Bağdatlı**, (2010). *Esnek Üstyapı Kaplamalarındaki Hasar Özelliklerinin Bakım Maliyetleri Üzerindeki Etkisi*, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] **Görgülü, M.** (2018). *Değişik tipteki agrega ve bağlayıcının sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine etkisi*, (Yüksek Lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] **Tunç, A.**, (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayın, Ankara.
- [19] **Umar, F. ve Ağar, E.**, (1985). *Yol Üstyapısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [20] **Boutet, D.**, (1949). *Yol Tekniği*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris.
- [21] **Agregalar**, Erişim: 01 Temmuz 2019, [http://kisi.deu.edu.tr//selcuk.turkel/Ders3-agrega\(1\).pdf](http://kisi.deu.edu.tr//selcuk.turkel/Ders3-agrega(1).pdf).
- [22] **Orhan., F.**, (2012), *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [23] **Mazlum, M. S.** (2014). *Ekonomik ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların kazınarak bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] **Gündoğdu, C.** (2009). *Asfaltit asfaltının özelliklerinin belirlenmesi ve geleneksel rafineri asfaltı ile karşılaştırılması*, (Yüksek Lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [25] **Asfalt plenti nedir**. Erişim: 01 Haziran 2019, <https://insapedia.com/asfalt-plenti-nedir/>

- [26] **Yavuz, C. S.** (2018). *Bitümlü sıcak karışımlarda asfalt plent atıklarının değerlendirilmesi*, (Yüksek Lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] **Asfalt plent tesisine genel bakış.** Erişim: 24 Temmuz 2019, <http://politamakine.com/asfalt-plenti-nedir/>
- [28] **Sıcak Karışım Asfalt Kaplama Yapımı El Kitabı**, (2012) Türkiye Asfalt Mühendisleri Derneği, Ankara.
- [29] **Güngör, A. G., Orhan F., Kaşak, S., Çalışkol, A., Yönter G.** *Kazınmış asfalt kaplamaların yeniden kullanımı KGM uygulamaları*. Erişim: 14 Haziran 2019, <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments>.
- [30] **İnce, M.** (2012), *Asfalt kaplama yol üstyapılarında oluşan bozulmaların araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [31] **Avcı, E.** (2009). *Sıcak iklimli bölgelerde kullanılan asfalt betonu karışım değişkenlerinin kaplama tabakası performansına etkisi*. (Yüksek Lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [32] **Asfalt bozulmaları neden oluşur?** Erişim: 24 Temmuz 2019, <https://www.movea.com.tr/asfalt-bozulmalari-neden-olusur/>
- [33] **Salta, İ.** (2010). *Bitümlü karışımların geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Asphalt removal and replacement at compton industrial waste facility.** Erişim: 26 Temmuz 2019, <https://www.paveit.com/asphalt-removal-and-replacement-at-compton-industrial-waste-facility/>.
- [35] **Hot in place recycling.** Erişim: 26 Temmuz 2019, <https://www.hotinplacerecycling.com/>.
- [36] **Cold Planning.** Erişim: 26 Temmuz 2019, <https://www.abslconstruction.com/asphalt-milling-services/cold-planing/>.
- [37] **Kaya, D., Topal, A.** Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi, *CBÜ Fen Bil. Dergi.*, 12, 289-302
- [38] **Asphalt Mix Design Methods**, (2014). USA Asphalt Institute, 7. Edition

- [39] **Özgan, E., Yıldız, K.** (2003). Asfalt Betonunda Bitüm Yüzdesinin Stabiliteye Etkisinin Araştırılması, *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- [40] **Deniz, M. T., Lav, A. H.** (2010). Asfaltlarda bitümle birlikte granüler sülfür kullanımının stabiliteye etkisi, *İTÜ Dergisi*, 9 (6), 137-148.
- [41] **Karayolları Teknik Şartnamesi**, (2013). T. C. Karayolları Genel Müdürlüğü
- [42] **Akbulut, H., Gürer, C.**, (2006). Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 3943-3960



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ferhat ÜNLÜ
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.06.1983 / İstanbul
E-posta : unlufe@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2006 -)