

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİNDER TABAKASINDA ELEKTRİK ARK
OCAĞI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK KULLANIMININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak ÖZUĞURLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİNDER TABAKASINDA ELEKTRİK ARK
OCAĞI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK KULLANIMININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Burak ÖZUĞURLU
(501121403)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Öğr.Gör.Dr. A. Faik İYİNAM

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121403 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **BURAK ÖZUĞURLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİNDER TABAKASINDA ELEKTRİK ARK OCAĞI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK KULLANIMININ İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Öğr.Gör.Dr. A. Faik İYİNAM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

 Prof. Dr. Onuralp YÜCEL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**

Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmalarım boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Öğr. Gör. Dr. A. Faik İYİNAM'a teşekkürlerimi sunarım. Fikir ve görüşleri ile her zaman destek olan, tecrübesi ile yol gösteren İnşaat Yüksek Mühendisi Fatih YONAR'a minnettarlığımı sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi, manevi her türlü desteklerini benden esirgemeyen aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mayıs 2015

Burak Özuğurlu
Geomatik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU ÜSTYAPISI	3
2.1 Giriş	3
2.2 Rijit Üstyapı	4
2.3 Komposit Üstyapı	6
2.4 Esnek Üstyapı	7
2.4.1 Taban zemini	8
2.4.2 Alttemel tabakası	8
2.4.3 Temel tabakası	9
2.4.4 Kaplama tabakası	10
2.4.4.1 Binder tabakası	10
2.4.4.2 Aşınma tabakası	11
3. ESNEK ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ	13
3.1 Bitümlü Bağlayıcılar	13
3.2 Agregalar	17
3.2.1 Alttemel tabakasında kullanılan malzemeler	18
3.2.2 Temel tabakasında kullanılan malzemeler	20
3.2.3 Kaplama tabakasında kullanılan malzemeler	25
4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ VE CÜRUF OLUŞUMU	31
4.1 Demir Çelik Üretimi	31
4.1.1 Yüksek fırında demir üretimi	35
4.1.2 Bazik oksijen fırınında çelik üretimi	37
4.1.3 Elektrik ark ocağında çelik üretimi	39
4.2 Demir Çelik Üretiminde Cüruf Oluşumu	42
4.2.1 Yüksek fırın cürufu	43
4.2.2 Bazik oksijen fırını cürufu	44
4.2.3 Elektrik ark ocağı cürufu	46
5. DEMİR ÇELİK CÜRUFALARININ ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI	49
5.1 Demir Çelik Cüruflarının Fiziksel Özellikleri	50
5.2 Demir Çelik Cüruflarının Kimyasal Özellikleri	52

5.3 Demir Çelik Cürufalarının Kullanım Alanları	54
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	59
6.1 Kullanılan Malzemeler	59
6.1.1 EAO cürufu	59
6.1.2 Doğal agrega	60
6.1.3 Bitüm.....	60
6.2 Malzemelere Uygulanan Deneyler	61
6.2.1 Agregalara uygulanan deneyler	61
6.2.1.1 Elek analizi	61
6.2.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini	62
6.2.1.3 Los Angeles deneyi	66
6.2.1.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık.....	67
6.2.1.5 Kırılmışlık oranı	69
6.2.1.6 Yassılık indeksi	70
6.2.1.7 Cilalanma Değeri.....	71
6.2.1.8 Soyulma mukavemeti	72
6.2.1.9 Kil toprakları ve ufalanabilir daneler.....	74
6.2.1.10 Metilen mavisi	75
6.2.2 Bitümlere uygulanan deneyler	76
6.2.2.1 Özgül ağırlık.....	76
6.2.2.2 Penetrasyon	77
6.3 Marshall Tasarım Yöntemi.....	79
6.3.1 Briketlerin hazırlanması.....	80
6.3.2 Marshall akma ve stabilite okumaları	82
6.3.3 Yoğunluk ve boşluk analizleri	83
6.3.3.1 Agrega karışımının tane yoğunluğunun hesaplanması.....	83
6.3.3.2 Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı	84
6.3.3.3 Bitümlü karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı	85
6.3.3.4 Sıkıştırılmış bitümlü karışımında hava boşluğu yüzdesinin hesaplanması	85
6.3.3.5 Sıkıştırılmış bitümlü karışımındaki agregalar arası boşluk yüzdesinin hesaplanması	86
6.3.3.6 Sıkıştırılmış bitümlü karışımındaki bitümle dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması	86
6.3.4 Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi.....	87
7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	89
7. 1 Agrega Deneyleri.....	89
7.1.1 Elek analizi deneyi sonucu.....	90
7.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyi sonucu	91
7.1.3 Los Angeles deneyi deneyi sonucu.....	93
7.1.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonucu	93
7.1.5 Kırılmışlık oranı deneyi sonucu.....	94
7.1.6 Yassılık indeksi deneyi sonucu	94
7.1.7 Cilalanma değeri deneyi sonucu	95
7.1.8 Soyulma mukavemeti deneyi sonucu.....	95
7.1.9 Kil toprakları ve ufalanabilir daneler deneyi sonucu	96
7.1.10 Metilen mavisi deneyi sonucu	97
7.2 Bitüm Deneyleri	97
7.2.1 Penetrasyon değeri	97

7.2.2 Özgöl ağırlık	98
7.3 Marshall Analizleri	98
7.3.1 Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgöl ağırlığı	99
7.3.2 Sıkıştırılmış bitümlü karışım da hava boşluğu yüzdesinin hesaplanması	101
7.3.3 Sıkıştırılmış bitümlü karışım daki agregalar arası boşluk yüzdesinin hesaplanması	103
7.3.4 Sıkıştırılmış bitümlü karışım daki bitümle dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması	105
7.3.5 Stabilit e	106
7.3.6 Akma	108
7.4 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi	110
7.4.1 Optimum bitüm yüzdesi miktarına göre elde edilen sonuçlar	112
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	119
EKLER	125
ÖZGEÇMİŞ	129

KISALTMALAR

EAO	: Elektrik Ark Ocağı
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
CBR	: California Bearing Ration
TS	: Türk Standartları
VMA	: Agregalar arası boşluk
VFA	: Bitümle dolu boşluk
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
DOP	: Decleration of performance

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1: Kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri	16
Çizelge 3.2: Alttemel malzemesi gradasyon limitleri.....	19
Çizelge 3.3: Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 3.4: Alttemel sıkıştırma kriterleri	20
Çizelge 3.5: Kaba agreganın fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 3.6: İnce agreganın fiziksel özellikleri	21
Çizelge 3.7: Granüler temel tabakası gradasyon limitleri	21
Çizelge 3.8: Granüler temel tabakası sıkışma kriterleri.....	22
Çizelge 3.9: Plentmiks temel tabakası gradasyon limitleri.....	22
Çizelge 3.10: Plentmiks temel tabakası sıkışma kriterleri.....	22
Çizelge 3.11: Çimento stabilizasyonlu temel tabakası gradasyon limitleri	23
Çizelge 3.12: Bitümlü temel tabakası gradasyon limitleri.....	23
Çizelge 3.13: Kaba agreganın fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 3.14: İnce agreganın fiziksel özellikleri	24
Çizelge 3.15: Bitümlü temel dizayn kriterleri	25
Çizelge 3.16: Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları.....	25
Çizelge 3.17: Binder tabakası gradasyon limitleri.....	26
Çizelge 3.18: Aşınma tabakası gradasyon limitleri	26
Çizelge 3.19: Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri	27
Çizelge 3.20: İnce agreganın fiziksel özellikleri	27
Çizelge 3.21: Asfalt betonu dizayn kriterleri.....	28
Çizelge 3.22: Sıkışma ve yüzey kalınlık özellikleri	29
Çizelge 4.1: Dünya geneli Demir-Çelik üretimi.....	31
Çizelge 4.2: Ham çelik üretim verileri	32
Çizelge 4.3: Ham çelik kapasitesi ve üretimi	33
Çizelge 4.4: Tüketici sektörlerinin 2013 yılında çelik tüketimindeki payı	34
Çizelge 5.1: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait fiziksel özellikler.....	51
Çizelge 5.2: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait mekanik özellikler.....	51
Çizelge 5.3: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait özellikler	52
Çizelge 5.4: Yüksek fırın cüruflarının kimyasal içerikleri	53
Çizelge 5.5: Çelikhane cüruflarının kimyasal içerikleri	54
Çizelge 5.6: Ulusal ve bölgesel cüruf birlikleri	55
Çizelge 6.1: Amerikan Elek Sistemi.....	59
Çizelge 7.1: Doğal agrega ve EAO cürufu kimyasal analiz sonuçları.	89
Çizelge 7.2: Doğal agreganın ve EAO cürufu agregasının fiziksel ve mekaniksel özellikleri.....	90
Çizelge 7.3: Çalışmada kullanılan granülometri limitleri.....	91
Çizelge 7.4: Kaba ve ince agrega özgül ağırlık değerleri.....	92
Çizelge 7.5: Filler malzemesi özgül ağırlık değerleri.....	92
Çizelge 7.6: Kaba agrega ve ince agrega su emme oranları	93
Çizelge 7.7: Los Angeles deneyi sonuçları.....	93

Çizelge 7.8: Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi.	94
Çizelge 7.9: Yassılık indeksi deneyi.	95
Çizelge 7.10: Cilalanma değeri deneyi.	95
Çizelge 7.11: Soyulma mukavemeti deneyi.	96
Çizelge 7.12: Kil topakları ve ufalanabilir daneler.	97
Çizelge 7.13: Metilten mavisi deneyi.	97
Çizelge 7.14: Doğal agrega numunesi için %4.3 bitüm miktarına göre sonuçlar.....	112
Çizelge 7.15: EAO cürufu agregası numunesi için %4.7 bitüm miktarına göre sonuçlar.	112

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Beton kaplama tipleri	4
Şekil 2.2: Rijit üstyapı kesitleri	6
Şekil 2.3: Kompozit üstyapı kesitleri.....	6
Şekil 2.4: Esnek üstyapı katmanları	7
Şekil 3.1: Rafineri prosesleri akım şeması	14
Şekil 3.2: Kimyasal bileşen ile penetrasyon indeksi arasındaki ilişki	15
Şekil 4.1: Türkiye’deki demir çelik üretim tesisleri ve yıllık kapasiteleri.	33
Şekil 4.2: Entegre ve ark ocaklı demir çelik tesislerinde üretim akışı.....	35
Şekil 4.3: Yüksek fırın şeması.....	36
Şekil 4.4: Üstten üflemlili bazik oksijen fırını	38
Şekil 4.5: Bazik oksijen fırını	39
Şekil 4.6: Elektrik ark ocağı elektrotları.....	40
Şekil 4.7: EAO işlem sırası.....	41
Şekil 4.8: Demir cürufu.	42
Şekil 4.9: Yüksek fırın cürufunun soğutulması	45
Şekil 4.10: BOF işlem adımları	46
Şekil 4.11: EAO’ndan sıvı çeliğin alınması	48
Şekil 5.1: Üretim yöntemlerine göre ortaya çıkan yaklaşık yan madde kütleleri.....	50
Şekil 5.2: Avrupa ülkelerindeki yüksek fırın cürufu kullanımı.....	58
Şekil 5.3: Avrupa ülkelerindeki çelikhane cürufu kullanımı.....	58
Şekil 6.1: Konkasör	60
Şekil 6.2: Agregaların su içerisinde bekletilerek doygun hale getirilmesi	64
Şekil 6.3: Filler özgül ağırlık tayini.....	66
Şekil 6.4: Los Angeles test makinası.....	67
Şekil 6.5: Kurutulan agregaya magnezyum sülfat çözeltisi eklenmesi.	69
Şekil 6.6: Yassılık indeksi elekleri	70
Şekil 6.7: Cilalanma test makinası ve cilalanma numunesi.....	71
Şekil 6.8: Cilalanma deneyi sürtünme test cihazı.....	72
Şekil 6.9: Soyulma mukavemeti deney numuneleri.	73
Şekil 6.10: Kil toprakları ve ufalanabilir daneler deney numuneleri.....	74
Şekil 6.11: Metilen mavisi deneyi.	76
Şekil 6.12: Penetrasyon indeksi cetveli	78
Şekil 6.13: Marshall kalıpları.	80
Şekil 6.14: Briket hazırlanması.	81
Şekil 6.15: Marshall tokmağı ve briketler.	82
Şekil 6.16: Marshall akma ve stabilite deneyi.....	83
Şekil 7.1: Çalışmada kullanılan granülometri eğrisi.....	91
Şekil 7.2: Agregalar arası boşluk değeri şeması.....	99
Şekil 7.3: Doğal agrega numunesi pratik özgül ağırlık – bitüm miktarı grafiği.....	100
Şekil 7.4: EAO cürufu agregası numunesi pratik özgül ağırlık – bitüm miktarı grafiği	101

Şekil 7.5: Doğal agrega numunesi boşluk – bitüm miktarı grafiği.....	102
Şekil 7.6: EAO cürufu agregası numunesi boşluk – bitüm miktarı grafiği	102
Şekil 7.7: Doğal agrega numunesi agregalar arası boşluk – bitüm miktarı grafiği .	104
Şekil 7.8: EOA cürufu agregası numunesi hava boşluğu – bitüm miktarı grafiği..	104
Şekil 7.9: Doğal agrega numunesi bitümle dolu boşluk – bitüm miktarı grafiği.....	105
Şekil 7.10: EAO cürufu agregası numunesi bitümle dolu boşluk – bitüm miktarı grafiği.	106
Şekil 7.11: Doğal agrega numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği.	108
Şekil 7.12: EAO cürufu agregası numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği.	108
Şekil 7.13: Doğal agrega numunesi akma – bitüm miktarı grafiği.	109
Şekil 7.14: EAO cürufu agregası numunesi akma – bitüm miktarı grafiği	110
Şekil 7.14: Doğal agrega numunesi boşluk, stabilite ve akma analizleri.....	111
Şekil 7.15: EAO cürufu agregası numunesi boşluk, stabilite ve akma analizleri. ...	111

KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİNDER TABAKASINDA ELEKTRİK ARK OOCAĞI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK KULLANIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Türkiye, Dünya genelindeki ham çelik üreticileri arasında önemli bir yerde bulunmaktadır. Yıllık üretim miktarı ile en büyük ham çelik üreticileri arasında ilk 10 içinde olan Türkiye’de, 2013 yılında üretilen 35 milyon ton ham çeliğin 24 milyon tonu elektrik ark ocağı kullanılarak elde edilmiştir. Ülkemizde üretilen ham çelik büyük ölçüde hurda metalin geri dönüştürülmesine dayanmaktadır. İç piyasa imalat için gereken hurda çelik talebini karşılayamaması nedeniyle, Türkiye’nin 2013 yılındaki hurda çelik ithalatı 24 milyon ton olarak gerçekleşmiş ve Dünya’nın en büyük hurda çelik ithalatçısı olmuştur. Ülkemizde hurda çelik bu denli önemli bir şekilde geri dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmasına rağmen, çelik üretiminde yan madde olarak ortaya çıkan cüruf değerlendirilmeden stok sahalarında depolanmaktadır. Günümüze kadar depolanmış cüruf miktarının 100 ile 140 milyon ton arasında olduğu tahmin edilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, elektrik ark ocağı cürufunun, karayolu esnek üstyapısının binder tabakasında hammadde olarak kullanılabilirliği incelenmiş ve yapay agrega olarak değerlendirilebilirliği üzerinde çalışma yapılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, çalışmanın amaçları ve gerekliliği, ülkemizde demir çelik sektörü ve inşaat sektörü hakkında genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde karayolu üstyapı tabakaları ele alınarak açıklamalarda bulunulmuştur.

Üçüncü bölümde esnek üstyapı tabakalarında kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcılar hakkında bilgi verilmiş ve Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’e göre kullanılması istenen bu malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine ilişkin yeterlilik koşullarına yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde demir çelik üretimi ve üretim yöntemleri yer almaktadır. Üretim yöntemlerine göre ortaya çıkan farklı tür cürufların oluşumu hakkında bilgi verilmiş ve oluşan cürufun depolanması açıklanmıştır. Beşinci bölümde farklı yöntemler sonucu oluşan demir çelik cüruflarının fiziksel ve kimyasal özellikler açıklanmış ve diğer ülkelerdeki değerlendirilme alanları hakkında bilgiler verilmiştir.

Altıncı bölümde, bu çalışmada kullanılan bitüm, doğal agrega ve elektrik ark ocağı cürufu hakkında bilgi verilmiş, çalışmada kullanılacak yöntemler açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 Kısım 407 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakaları başlığı altında belirtilen agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığı yapılan deneyler ile kontrol edilmiştir, bunun yanı sıra kullanılan bitüm için de penetrasyon deneyi ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Doğal agrega ve EAO cürufu agregası ile karışım tasarımı yapılmış, yöntem olarak Asphalt Institute MS-2 kitabında

açıklanan Marshall Tasarım Yöntemi kullanılmıştır. Yedinci bölümde doğal agrega ve EAO cürufuna uygulanan deneyleri, Marshall Tasarım Yöntemi ile ulaşılan sonuçlar ve belirlenen optimum bitüm yüzdesi değerleri hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

INVESTIGATION OF THE USAGE OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AS AN ARTIFICIAL AGGREGATE IN THE BINDER COURSE OF FLEXIBLE PAVEMENTS

SUMMARY

Consumption of raw material is increasing day by day and in a limited environment, it is almost sure that in the future sources of raw materials will expire. Especially during the rapid industrialization era, it has been realized that the way people use natural resources, had an immense harm on the nature. Need of new resources resulted people to invade more wildlife areas and urbanize rural lands. All of the damaged caused by people has started to show its effects in the 20th century. Since late 1970's, recycling and reprocessing of disposal materials have been an important subjects in developed countries. Reusing a waste material does not only decrease the necessity of using natural resources but also increases the economic benefits of used material. Decreasing the demand also reduces the production costs by lowering costs of input materials and also there might be additional utilities that can not be acquired by traditional resources.

Some of studies have focused on reusing industrial disposals. The reason why it's been researched thoroughly is because of the countless amounts of produced waste materials. By reusing primary disposal industrial materials, significant benefits are being claimed. The main reason of the importance is, these materials are being produced continuously. Retrievaling waste material may decrease the production costs, increase the efficiency and reduces the usage of raw materials, more importantly growth of disposal areas could be avoided.

In this thesis, the usage of electric arc furnace slag was investigated in road construction. Turkey is the 8th biggest steel manufacturer in the world and every year 35 million tons of steel has been produced. 24 million tons of the total production is being made in electric arc furnaces and due to the way steel is produced, slag production is inevitable. According to studies, it is estimated that every year 3 to 4 million tons of electric arc furnace slag is obtained by manufacturers and stocked in storage areas. Total amount of 100 to 140 million tons of slag is currently occupying valuable free lands and accumulating over the time. In overseas countries blast furnace slag and steel slag are being used in different applications but in Turkey there isn't any beneficial reuse of slag.

Steel production by an electric arc furnace is the most common method in Turkey. It was so much used that in 2013 Turkey was declared as the biggest scrap steel importer. The purpose of this study is to investigate electric arc furnace slag as an artificial aggregate in road construction. By researching the availability, it is expected to reduce stocked waste materials of steel industry, reduce the demand of natural materials and gain economic benefits. Reducing the demand of natural

resources would help to save the nature, the wildlife and the ecosystem, which is highly interrupted in Turkey. The aim of the study is to ensure the usage of electric arc furnace slag in Turkey, so that applied tests and decisions were made according to the requirements described in The Technical Specification of Highways 2013 published by General Directorate of Highways. The study was focused on using electric arc furnace slag in a binder course of flexible pavements as an artificial aggregate. To being able to make a decision, the current method of building a road with natural aggregate was used for a comparison against the one built with steel slag. Compared examples had been made by using the Marshall Test Method described in Asphalt Institute MS-2 Asphalt Handbook and tested according to defined procedures.

In the first section of this study, general information about the steel industry in Turkey was introduced and the link between the steel production and slag was explained. The amount of slag produced by the steel industry according to statics was stated and slag treatment processes in Turkey were explained. According to given information the purpose, the scope and the importance of this study were given.

In the second section, brief information about different pavement types was given which are rigid, composite and flexible. For rigid and composite pavements, various application types were explained. Using of rigid and composite pavement purposes and advantages were mentioned. For flexible pavements, the investigated subject of this study, detailed information was given by introducing each layer (subgrade, subbase, base, binder and wearing courses).

In the third section, more information about flexible pavements was given in relation to the purpose of this study. Materials that are used to build a flexible pavement, like bituminous materials and aggregates, were briefly explained. For each layer of the pavement, the required specifications of the each material according to Technical Specification of Highways 2013 were given.

In the fourth section, iron and steel productions were explained. For iron production, sources of iron and the production in a blast furnace were described. Steel productions by methods (basic oxygen furnace and electric arc furnace) were briefly explained. For each type of furnaces, production process was explained. Slag productions due to iron and steel productions were introduced, types of slags were explained and the treatments of produced slag for different furnaces were mentioned.

In the fifth section, for different types of slags, physical structures occurred by cooling methods were briefly explained. Also chemical compositions and physical properties were mentioned. Addition to slags' specifications, alternative usages of slag were described. Various applications and benefits of using slag as an input material were explained.

In the sixth section, firstly, materials used in this study were introduced. Performed tests for natural aggregate and steel slag that are supposed to determine physical properties were mentioned. Tests for bitumen used in the study were applied as well. For each test method, required test standards and followed procedures were briefly explained. Secondly, the design method for binder layer used in this study, Marshall Test Method described in Asphalt Institute MS-2 Asphalt Handbook, was explained.

Test procedure was mentioned and necessary calculations in order to make a pavement design were given.

In the seventh section, results of tests for determining the specifications of materials that had been described in the sixth section were given and comparisons with required specifications stated in The Technical Specification of Highways 2013 Section 407 Asphalt Concrete Binder and Wearing Courses. Data obtained from Marshall Test Method was given and drawn graphics according to different mixtures were plotted. Each graphic was described briefly.

In the last section of this study, electric arc furnace slag as an artificial aggregate was evaluated. The evaluation was made in two sections. Firstly general pros and cons for steel slag as an artificial aggregate was mentioned then for the given optimized asphalt content for each material, calculated results were compared and suggestions were given.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu, atış hızındaki sürekli büyüme ile her geçen yıl daha büyük hızla artmaktadır. Artan nüfus ile yeni yaşam alanları oluşturulmakta ve doğal kaynakların tüketimi hızlanmaktadır. Teknolojideki ilerlemeler ve sanayileşmenin gelişmesi ile insanların tüketim alışkanlıkları değişmiş ve sürekli olarak yeniyi isteyen toplumlar oluşmuştur. Nüfusun artması ve yeni ürünlerin tüketim talebi, üreticilerin doğal kaynaklara olan ihtiyacını arttırmıştır. Özensiz ve verimsiz değerlendirilen doğal kaynaklar tükenmekte ve yeni kaynakların arayışı içine girilmektedir. Bu sebeple doğal yaşam alanları tahrip edilmekte ve Dünya'nın iklimi etkileyecek boyutta zararlar verilmektedir.

20. yüzyılın son çeyreğinde insan nüfusunun Dünya'ya verdiği zarar dikkate alınmaya başlamış ve kaynakların verimli kullanılması ile çevreye verilen zararın azaltılması yönünde çalışmalara başlanmıştır. Birincil üretim sonrası ortaya çıkan atık maddelerin, sahalarda depolanarak yaşam alanlarını işgal etmesi yerine başka alanlarda değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar önem kazanmış ve bu sayede doğal hammadde ihtiyaçlarının azaltılması hedeflenerek değersiz görülen maddelerin ekonomiye kazandırılması amaçlanmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda önem kazanan geri dönüşüm ve atık maddelerin kullanımı, kaynakların verimli kullanılması ve gelecek nesillere bırakılacak yaşam kaynakları için ağırlık verilmesi ve uygulanması gereken bir konudur. Türkiye'nin iki büyük sanayi kolu olan demir-çelik sektörü ve inşaat sektörü ülke ekonomisi içerisinde önemli yer teşkil etmektedir.

Türkiye, yıllık ham çelik üretim miktarı göz önünde bulundurulduğunda Dünya genelinde 8. sırada yer almaktadır. Ülkemizde ham çelik üretimi çok büyük ölçüde hurda çeliğin tekrar eritilmesi ile yapılmaktadır. Hurda çeliğe olan ihtiyaç, Türkiye'yi Dünya'nın en büyük hurda ithalatçısı ülke yapmaktadır. Ancak çelik üretimi, yan madde olan cürufun oluşumuna ihtiyaç duymaktadır. Önemli seviyede ham çelik üretimi yapılan ülkemizde ortaya çıkan cüruf atık madde olarak

sınıflandırılmakta ve depolama alanlarında sürekli olarak stoklanmaktadır. Bugüne kadar ülkemizde demir çelik üretiminden dolayı 100 ile 140 milyon ton cüruf olduğu tahmin edilmektedir [1].

Türkiye'nin bir diğer önemli sanayi kolu inşaat sektörüdür. 2010 yılı verilerine göre ülkemizde inşaat sektörünün gayri safi milli hasıladaki payı %6,4'tür. İnşaat sektörü önemli ölçüde ham madde gereksinimi duymaktadır. Karayolu inşaatı incelendiğinde temel girdi malzeme taş ocaklarından elde edilen kırmataş ve petrolden elde edilen bitümdür. Ülkemizde her dönem öncelik verilen karayolu inşaatı doğal taş kaynaklarının tüketilmesinde önemli pay sahibidir. 2013 yılı içerisinde toplam üretilen bitümlü sıcak karışım miktarı 46,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Yeni taş ocaklarına olan ihtiyaç doğal yaşam alanlarına zarar verilmesine neden olmakta, doğal alanlar içerisinde taş ocakları kurulmasına ve üretim sonucu oluşan atıklar ile çevre bölgelerde kirlilik oluşturmaktadır [2], [3].

Bu çalışmada, ülkemizde ham çelik üretimi sonucu oluşan ve stoklanan cürufun inşaat alanında kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Stok sahalarında depolanmış elektrik ark ocağı cürufunun karayolu inşaatına hammadde girdisi olarak değerlendirmesi ile cürufun ekonomiye kazandırılması, stok sahalarının boşaltılarak geri kazanımı, doğal kaynakların korunması ve doğal taş üretimi ihtiyacının azalması ile üretim için harcanan enerjinin azaltılması yönünden faydalar öngörülmektedir. Yapılan çalışmada elektrik ark ocağı ile doğal agreganın fiziksel özellikleri karşılaştırılmış ve Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak EAO cürufunun karayolu esnek üstyapı binder tabakasında yapay agrega olarak kullanılabilirliği incelenmiştir.

2. KARAYOLU ÜSTYAPISI

2.1 Giriş

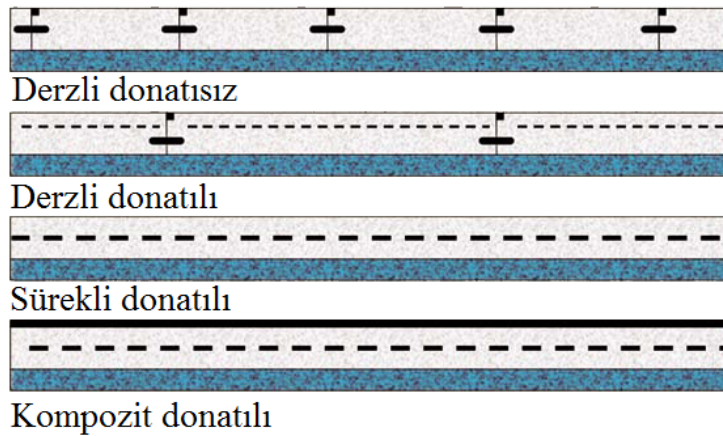
Karayolu; her türlü taşıt ve yaya ulaşımı için kamunun yararlanmasına açık olan arazi şerididir. Yolun toprak işi sonunda, daha önceden belirlenen kot ve enkesit şekline getirilmiş kısmına altyapı denilmektedir. Menfez, drenaj tesisleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı içine girmektedir. Alt yapı yolun esas taşıyıcı kısmıdır. Ancak, altyapının taşıyıcılık görevini iyi şekilde yapabilmesi için üzerine başka tabakaların yapılması gerekmektedir. Yolun, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak üzere altyapı üzerine inşa edilen ve alttemel, temel, kaplama tabakalarından oluşan kısmı ise üstyapı olarak tanımlanmaktadır. Kaplama tabakası üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilimlerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle, daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olması gerekmektedir. Kaplama tabakasının; trafiğin aşındırma etkisine karşı koymak, temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak, yüzey sularının temel tabakasına geçmesini önlemek ve emniyetli bir sürüş sağlamak, yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak gibi işlevleri bulunmaktadır [4], [5].

Karayolu üstyapıları, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olmak üzere iki şekilde inşa edilmektedir. Rijit üstyapının kaplama tabakası çimento betonundan oluşmaktadır. Bitümlü kaplama tabakalarıyla oluşturulan üstyapılar ise esnek üstyapılar olup kazanılan bilgi ve tecrübe nedeniyle ülkemizde tercih edilmektedir. Karayolu esnek üstyapıları, tabakalı bir üstyapı tipidir. Esnek üstyapıları oluşturan tabakalar, en üstten alta doğru, kaplama, temel ve alttemel tabakalarıdır. Bu tabakalardan taban zemininin üzerine inşa edilen alttemel tabakası, yapısal olarak üstteki tabakalardan gelen yükleri, taban zemininin taşıma sınırları içerisinde dağıtarak, taban zeminine

iletmek ve üstteki tabakaları, yer altı suyunun zararlı etkilerinden ve donma olayından korumak amacıyla yapılmaktadır [6].

2.2 Rijit Üstyapı

Beton kaplamalar, çok yüksek trafik hacmine ve ağır taşıt trafiğine sahip karayollarında taşıtlar için gerekli sürüş konforu ve sürüş emniyeti temin etmek amacıyla yapılan yüksek standartlı rijit üstyapılardır. Modern çağlarda ilk beton yol 1880 yılında Avustralya'nın Sydney şehrinde yapılmıştır. A.B.D. de ilk beton yol Ohio Eyaleti'nin Bellefontaine şehrinde 1891 yılında yapılmıştır. Beton yolların yaygınlaşması 20. Yüzyıl'ın ortalarına doğru hız kazanmıştır. Yüzyılın ilk yarısında A.B.D.'ye ilaveten Fransa ve Belçika'da, daha sonra Almanya'da beton yollar yapılmıştır. 1930'lu yıllarda 2. Dünya Savaşı'na hazırlanan Almanya'da beton otoyolların uzunluğu yaklaşık 4.000 km kadardır. A.B.D.'de 1957 yılında başlayan "Eyaletlerarası Otoyol Sistemi" tamamlandığında önemli bölümü beton kaplama olarak 60.000 km'den fazla yol yapılmıştır. Bugün A.B.D.'de bazı büyük şehirlerin çevre yolları da beton kaplamadır. Son 50 yıl içerisinde Belçika, Fransa, Almanya'ya ve Avustralya'ya ilaveten Avusturya, İspanya, İngiltere , Kanada ve Güney Afrika gibi ülkelerde beton yollar yapılmıştır. Son yıllarda Azerbaycan, Hindistan ve Çin'de beton yol projeleri başlamıştır. Beton yol tasarım ve yapım teknikleri de zamanla gelişmiştir. Bugün uygulamada olan bazı beton kaplama tipleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir [7], [8].



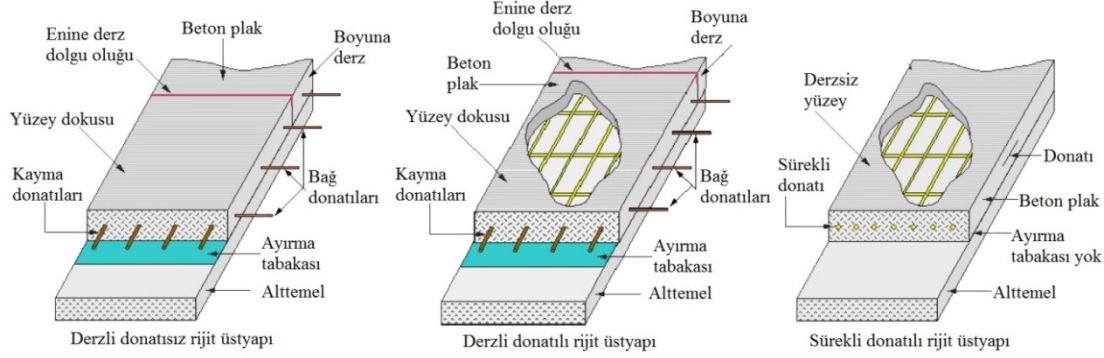
Şekil 2.1: Beton kaplama tipleri [8].

Rijit bir üst yapının davranışı taban zeminin fiziksel özellikleri ve taşıma gücü ile doğrudan doğruya ilgilidir. Bazı taban zeminleri rijit kaplamaların davranışlarına zarar verecek özelliktedirler. Bu zararlı etkileri plak kalınlığını arttırarak gidermek mümkün değildir. Bu sebeple taban zemininin plastisite indeksi 25'in altında ise önceden belirlenen yoğunlukların %95'i elde edilecek şekilde sıkıştırılması, yüksek plastisite indeksine sahip killi zeminlerde alttemel tabakasına ilave olarak yeterli kalınlıkta seçme malzeme örtülmesi ve yapım sırasında doğal zeminin bileşimi, yoğunluğu ve su oranının üniform kalmasını sağlayacak önlemler alınmalıdır. Alttemel, taban zemini üzerine serilen seçme malzeme tabakasıdır. Genellikle tabanın taşıma gücünü arttıracak kalın bir alttemel kullanmak yerine tabanın mevcut taşıma kapasitesine göre plak hesaplanmaktadır [9].

Beton kaplamaların tasarımında yükü taşımak için gerekli beton dayanımı kadar nem ve sıcaklık değişiminden kaynaklanan çatlamların en aza indirilmeleri ve kontrol altında tutulmaları önem kazanmaktadır. Bu tür çatlamalara karşı beton yol yapımında derz sistemleri ve çelik donatı kullanılmaktadır, bu sayede beton plakalarda oluşabilecek çatlakların büyümesini önlemektir. Ayrıca beton rötrey yaparak uçlardan plağın ortasına doğru hareket ettiği ve alt yüzeydeki sürtünme buna karşı bir direnç gösterdiği sırada ve kaplamanın tamamlanması ile prizın tamamlanması arasında geçecek süre boyunca rötreyi plağın bütün uzunluğuna yaymaktadır.

Derzler yol eksenine göre enine, boyuna veya bazen, çapraz olabilmektedir. Tam derzler plak kalınlığı boyunca oluşturulurken yarım derzler plak kalınlığının sadece bir bölümüne kadar açılmakta ve çatlakların zayıflatılmış kesitte toplanmasını sağlamaktadır. Tam derzler, birlikte dökülmeyen plaklar veya kaplama ile diğer yapılar arasında yer almaktadırlar. Tam derz olan genleşme derzleri plakların sıcakta serbest genleşmelerini sağlamaktadır. Özellikle soğuk havada dökülen beton kaplamalar için gerekmektedir. Derzler yol yüzeyinde kesiklilik meydana getirmekte ve alt tabakalara su sızmasına neden olabilmektedir. Bu nedenlerle elastik dolgu malzemeleri ile doldurulup düzlenmeleri gerekmektedir. Derzli donatısız kaplamalarda plak boyutları enine ve boyuna derzlerle sınırlandırılmaktadır. Enine derzlerde kayma demirleri, boyuna derzlerde bağlantı demirleri kullanılmaktadır. Bu demirler yükün plaktan plaka yayılmasını ve sürüş rahatlığı için plakların birlikte

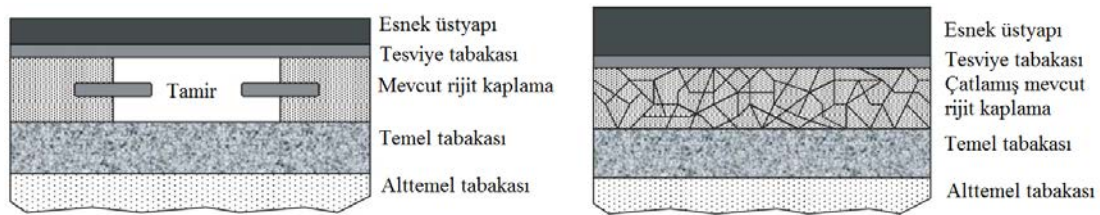
deforme olmasını sağlamaktadır. Derzli donatılı kaplamalarda derz aralıklarının fazla olması nedeniyle ilaveten çelik donatı kullanılmaktadır. Sürekli donatılı kaplamalarda ise ayrıca derz açılmasına gerek kalmamaktadır. Donatı olarak hasır çelik kullanılmaktadır. Çeşitli rijit üstyapı kaplamalarına ait kesitler Şekil 2.2’de verilmiştir [8], [10].



Şekil 2.2: Rijit üstyapı kesitleri [10].

2.3 Kompozit Üstyapı

Kompozit üstyapı, mevcut rijit üstyapı üzerine bir veya birden fazla bitümlü sıcak karışım katmanı serilmesi ile elde edilen üstyapı türüdür. Bitümlü sıcak karışım doğrudan tamir görmüş rijit üstyapı üzerine veya çatlayarak kırılmış rijit üstyapı tabakası üzerine serilebilmektedir. Şekil 2.3’de kompozit üstyapı kesitleri verilmiştir [11].



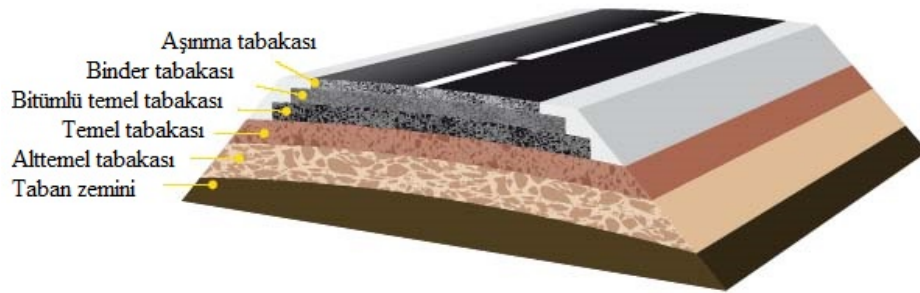
Şekil 2.3: Kompozit üstyapı kesitleri [11].

Rijit üstyapı üzerindeki esnek üstyapının tasarımı farklı etkilerin göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir. Bozulmuş bir yolun üzerine takviye tabakası getirilmesi halinde eski kaplamada yer alan çatlak bölgeleri yeni kaplamada zayıflık bölgesi oluşturmaktadır. Trafik ve çevre koşulları nedeniyle takviye tabakası altında yer alan bu çatlaklar boyunca gerilme yoğunlaşması meydana gelmekte ve eski

üstyapıdaki çatlaklar kısa sürede yüzeye çıkarak takviye tabakasının bozulmasına neden olmaktadır. Bu çatlaklar yansıma çatlağı olarak bilinmektedir. Yansıma çatlakları uygulanacak kaplamanın tasarımı ile beraber geosentetik malzemelerin uygulanması ile de önlenabilmektedir [11].

2.4 Esnek Üstyapı

Esnek kaplamalar, taşıtlar için gerekli sürüş konforu ve emniyeti sağlayabilme özelliğine ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterince stabiliteye sahip olacak şekilde farklı özelliklere sahip farklı tabakalardan yapılan çok tabakalı esnek bir yapıdır. Esnek üstyapıların performansı ve stabilitesi; sürüş konforu için pürüzsüz ve düzgün yüzeylere sahip olmaları, sürüş emniyeti için yeterince kayma direncine sahip olmaları, trafik yüklerinin yarattığı gerilmelerden ötürü kalıcı deformasyonlara karşı yeterince dirençli olmaları, trafik yüklerini zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde yayabilecek kalınlık ve mukavemete sahip olmaları, trafik, çevre ve iklimsel şartların aşındırmasına karşı yeterince dirençli olmaları ve kaplama üzerindeki yüzeysel suların temele ve zemine geçirmeyecek şekilde geçirimsiz olmaları ile değerlendirilmektedir. Esnek üstyapılar düşük standartlı kaplamalar olan yüzeysel kaplamalar ve yüksek standartlı kaplamalar olan bitümlü sıcak karışımlar olarak iki ayrı kalitede imal edilmektedirler. Düşük standartlı kaplamalar trafik hacminin düşük olduğu yollarda ekonomik olup yeterli performansı sağlayabilmektedirler. 2013 yılı itibari ile ülkemizdeki toplam yüzeysel kaplamalı yol 45.294 km'dir. Yüksek standartlı karayollarında ve otoyollarda ise bitümlü sıcak karışımlara sahip tabakaların kullanılması gerekmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar çok katmanlı olup bu katmanlara ait şema Şekil 2.4'te verilmiştir [7], [12].



Şekil 2.4: Esnek üstyapı katmanları [13]

2.4.1 Taban zemini

Yol üstyapısı, belirli bir taşıma gücüne sahip olan taban zemini üzerine inşa edilmektedir ve taban zemini altyapısının sınırını oluşturmaktadır. Bu sebeple taban zemini kaplamanın ve trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidir. Çevre ve iklim koşullarından ötürü kabarma, büzülme, don kabarması, oturma, su içeriğindeki değişiklikler gibi zemin özelliklerinin değişmesi, taşıma gücünde azalmalar, ilave gerilmeler gibi hususların oluşmaması veya oluşursa da kaplamada olumsuz etkiler yaratmaması gereklidir. Bir esnek üstyapının tabaka kalınlıkları dolayısıyla yapım maliyeti ve yolun servis süresi, taban zeminin permabilitesi, elastisitesi, plastisitesi, kayma mukavemeti, sıkışabilirliği ve taşıma gücü gibi mühendislik özellikleri ile bağlantılıdır [7], [14].

Zemin değişik dane çapındaki mineral ve organik maddeleri içeren su, katı, gaz fazlarından oluşan, değişik orjinlere sahip, çeşitli kompozisyon ve özellikler arzeden, yer kürenin dış kabuğunu oluşturan ve kayaların fiziksel ve kimyasal etkileri ile parçalanmasından meydana gelen malzemedir. Zemin, toprak ve kaya olmak üzere iki farklı yapıda olabilmektedir. Yol yapımında taban zemini yol güzergahında kazılan ya da belirli bir depodan alınan uygun nitelikli zeminlerle inşa edilmektedir. Genel olarak kaya zeminler hafriyat güçlükleri ve sıkıştırma dışında sorun oluşturmaz iken toprak zeminlerin potansiyel problemleri nedeniyle iyileştirilmeleri gerekebilmektedir. Zeminin iyileştirilmesi ile zeminin; kayma dayanımı ile gerilme-deformasyon modülü artmakta, sıkışabilirliği azalmakta, şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınmakta, geçirimsizliği azalmakta, çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimleri önlenmekte ve sıvılaşma potansiyeli azalmaktadır. Zeminin iyileştirmesi genel olarak kompaksiyon metodları, stabilizasyon metodları ve drenaj sistemleri ile yapılmaktadır [7], [15].

2.4.2 Alttemel tabakası

Alttemel, taban yüzeyi ile temel tabakası arasına yerleştirilen sıkıştırılmış daneli malzeme veya uygun bir bağlayıcı malzeme ile stabilize edilmiş malzeme tabakasıdır. Alttemel tabakasının, don kabarması, şişme ve büzülme gibi hacim değişimlerine karşı koymak, kaplama altında gerekli drenajı sağlamak, kaplamanın taşıma gücünü arttırmak gibi görevleri vardır. Alttemel tabakası üstteki tabakalara

nazaran daha az gerilmelere maruz kaldığından daha düşük kaliteli fakat yeraltı suyunu uzaklaştırma yeteneği yüksek ve yeterince kararlı olan granüler malzemelerden yapılmaktadır. Alttemel tabakası yol üstyapısında üniform ve kararlı dayanıklılık sağladığından dolayı hem serbestçe suyu süzmekte hem de erozyona karşı direnir sağlamaktadır. Aksi halde pompaj olayı meydana gelmektedir. Erozyon ve pompaj olayından sonra çatlak veya derz yerleri altında malzeme kaybı oluşabilmekte ve yol üstyapısını oluşturan tabakalarda boşluk meydana gelebilmektedir. Bu olay daha fazla çatlak oluşmasına derz yerlerinin bozulmasına neden olup, yol üstyapısının dayanıklılığını kaybetmesine yol açmaktadır bu sebeple alttemel tabakası, taban zemininin taşıma gücünü aşabilecek yüksek gerilmeleri ve tabanda oluşacak don etkisinin üstyapıya yansımaları önleyecek özelliklere sahip olmalıdır [16], [17].

2.4.3 Temel tabakası

Temel tabakası, kaplama tabakasının hemen altına yerleştirilen, daneli veya uygun bir bağlayıcı ile işlem görmüş malzeme tabakasıdır. Temel tabakasının başlıca görevi kaplama tabakasına dayanak sağlayarak, alttemel ve tabana gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir düzeye düşürmesi ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplamanın kırılmasını önlemekte ve üstyapının yük taşıma kabiliyetini arttırmaktır [16], [17].

Temel tabakaları; mekanik stabilizasyon temel, plentmiks temel, penetrasyon makadam temel, bitümlü makadam temel, sıcak karışım bitümlü temel ve çimentolu temeller olarak gruplandırılmaktadır. Çimentolu temeller; çimento ile zemin stabilizasyonu, çimento bağlayıcılı granüler temel ve zayıf beton olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [16].

Mekanik stabilizasyon temel, belirli fiziksel özelliklere ve gradasyona sahip agreganın optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra sinilindirler ile maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılması sonucu elde edilen stabil bir temel tabakasıdır [7].

Plentmiks temel, mekanik stabilizasyon temel tabakasında olduğu gibi, belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelendirilmiş bir gradasyona sahip agreganın plentte

optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilmektedir [7].

Penetrasyon madam temel ve bitümlü makadam temel uygulamaları düşük trafikli yollarda uygulanabilecek temel tipleridir. Bu tip temeller açık granülometreli olup trafik yükü altında sıkışmaktadırlar [16].

Çimento bağlayıcılı granüler temel, yüksek ve çok yüksek trafikli yollarda kullanılan bir temel tipidir. En az iki dane boyutu grubundaki agreganın sürekli granülometri verecek şekilde ve yeterli oranda çimento ile plentte karıştırılıp, serici ile serilmesi ile inşa edilmektedir [16].

Sıcak karışım bitümlü temel, belli granülometri sınırları içinde kırılmış kaba agrega ve ince agrega ile sürekli granülemetriye sahip olup, plentte sıcak bitümlü bağlayıcı ile karıştırılması ile elde edilmektedir. Bitümlü temel, bağlayıcısız granüle temel katmanına göre trafik yükünü dağıtmada daha etkili ve don nedeniyle oluşabilecek şişmeye karşı daha dirençlidir. Bitümlü temel, yoğun gradasyonlu olup, bitümlü sıcak karışımlara göre daha geniş gradasyon aralığına sahiptir ve daha az bağlayıcı içermektedir. Bitümlü temel için kullanılan malzeme bitümlü sıcak karışımlara göre daha düşük standartlarda olması nedeniyle daha ucuza imal edilmektedir [16], [18].

2.4.4 Kaplama tabakası

Bitümlü sıcak karışımlar, bir asfalt plentinde, gradasyonu kontrollü bir şekilde ayarlanmış agrega ile, uygun miktarı tayin edilmiş bağlayıcının sıcak olarak karıştırılması ile elde edilmektedir. Yüksek standartlı karayollarında ve otoyollarında yapılacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [19].

2.4.4.1 Binder tabakası

Binder tabakası, aşınma tabakası ile temel tabakası arasına serilen ve esnek üstyapı tabakasının yapısal bileşenidir. Binder terimi, aşınma tabakasını granüler temel ile birleştirerek bağlayan katmanı ifade etmektedir. Binder tabakasının amacı, aşınma tabakasından iletilen trafik yükünü temel tabakasının taşıma kapasitesini aşmayacak şekilde iletmek ve tekrarlı yüklerin etkilerine karşı direnç göstererek kalıcı

deformasyonun ve çatlamaların meydana gelmesini engellemektir. Ayrıca katmanlar arasındaki sıcaklık farklarının oluşturduğu kuvvetlere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Binder tabakasının serilmesi aşınma tabakasının serilmesi için uygun yüzey oluşturmaktadır ancak trafik yükünün az olduğu bölgelerde binder tabakası uygulanmayabilmektedir [20], [21].

2.4.4.2 Aşınma tabakası

Aşınma tabakası, üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalıdır. Aşınma tabakasının yeterli sürtünme katsayısına sahip olması, taşıtlar için düzgün yüzey sağlaması, gürültünün kontrolü, tekerlek izi direncine sahip olması ve geçirimsiz bir yüzey oluşturularak drenaj sağlaması gibi özellikleri nedeniyle diğer tabakalara göre en yüksek kalitedeki malzemeler ile yapılmaktadır ve diğer tabakalara göre maliyeti fazladır. Bu nedenle aşınma tabakası altında kalan tabakaların kalitesi, aşınma tabakasında gereksinimlerin sağlanması için ihtiyaç duyulan tabaka kalınlığını belirlemekte ve yolun üretim maliyetini etkilemektedir. Ülkemizde bitümlü temel ve binder tabakaları tek tip uygulamaya sahiptir. Aşınma tabakası ise yoldan beklenen performans özellikleri, iklim koşulları ve trafik durumu göz önüne alınarak değişkenlik arz eder. Ülkemiz karayollarında en çok kullanılan aşınma tabakası, geleneksel asfalt betonu aşınma tabakasıdır. Bunun dışında taş mastik asfalt ve poroz asfalt da bir aşınma tabakası tipidir [20], [22], [23].

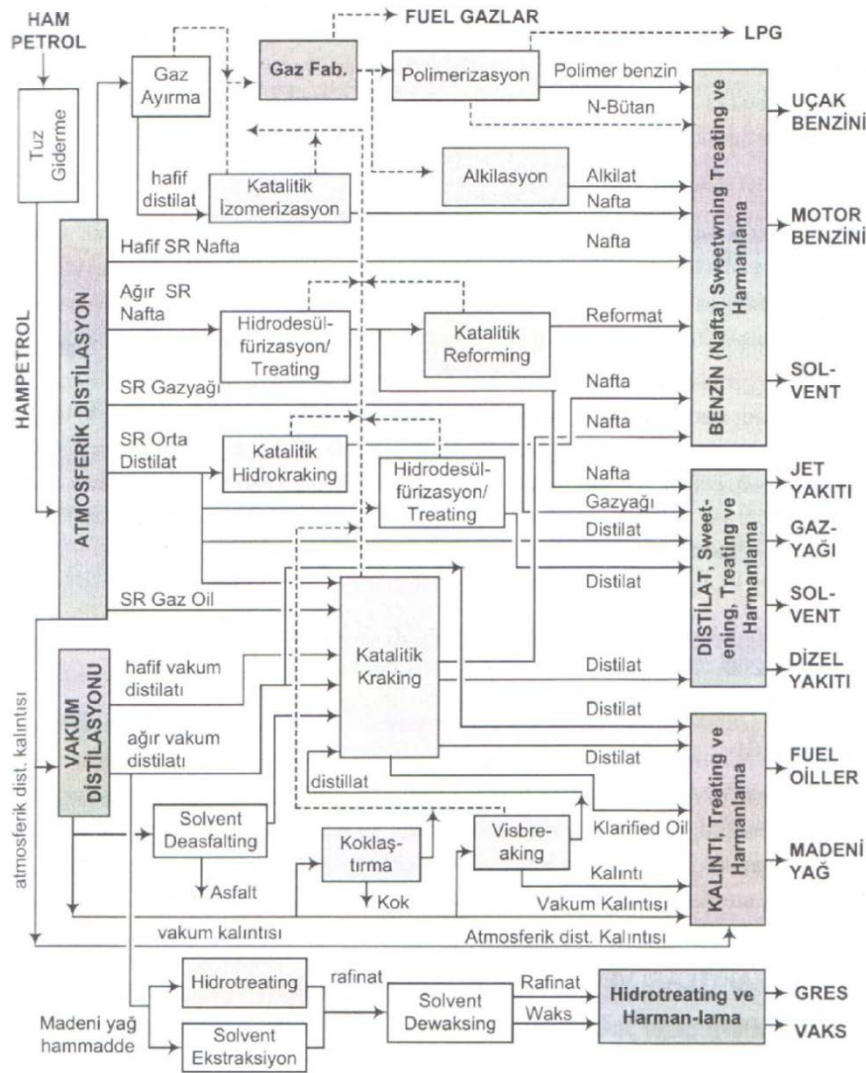
3. ESNEK ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Esnek üstyapı; hidrokarbonlu bağlayıcının ve agreganın karıştırılması ve serilmesi ile elde edilen üstyapı türüdür. Esnek üstyapı; tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alt temel tabakaları vasıtasıyla taban zeminine dağıtmaktadır. Üstyapının stabilite, adezyon, dane sürtünmesi ve kohezyon gibi özellikleri, kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. İnşa edilen üstyapının servis süresi üzerinde önemli ölçüde etkili olan agreganın ve bitümün özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Bu nedenle kullanılacak malzemelerin özellikleri, malzemelere uygulanacak deneyler ve sonuç aralıkları Karayolları Teknik Şartnamesi'nde üstyapı tabakalarına göre belirtilmiştir [24].

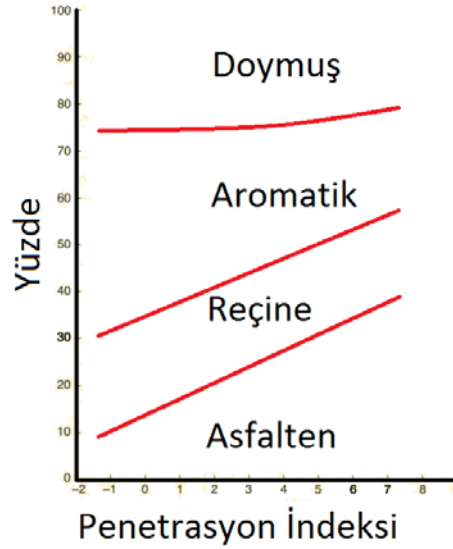
3.1 Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar temel olarak karbon ve hidrojen içermektedirler, bazı bitümler yapılarında nitrojen, sülfür, oksijen ve katı formda demir ile alümina bulundurabilmektedirler. Bitümler elde edilmelerine göre iki türde sınıflandırılmaktadırlar. Doğal bitümler; göl bitümü, kaya bitümü, gilsonit gibi kaynaklardan elde edilmektedirler. Katran; kömürün veya ağacın oksijensiz ortamda karbonize olması ile oluşmaktadır. 1960'lı yıllarda kömürün katranlaştırılması sırasında ortaya çıkan yan ürün hava gazı, şehirlerde kullanılmakta iken günümüzde kullanılmamaktadır. Rafineri bitümler ise ham petrolün damıtılması ile üretilmektedir. Ham petrol, farklı molekül ağırlığına ve farklı kaynama noktalarına sahip hidrokarbon bileşiklerinden oluşan kompleks bir karışımdır. Ham petrolün rafinerilerde arıtılması ve işlenmesi sonucunda ortalama olarak %43 benzin, %18 fuel oil ve motorin, %11 sıvılaştırılmış petrol gazı, propan veya propan-bütan karışımı, %9 jet yakıtı, %5 bitüm ve %14 oranında diğer ürünler elde edilmektedir. Ham petrolün arıtılma ve işlenme şeması Şekil 3.1'de verilmiştir. Rafineri bitümler ağırlıkları farklı hidrokarbonların karmaşık bir karışımı olup n-heptan'da

Asfaltinin sınır değerlerden fazla olması bitümün daha sert, daha viskoz, daha düşük penetrasyonlu ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip olmasına neden olmaktadır. Malten ise reçineler, aromatikler, doymuş hidrokarbonlar olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır. Reçineler, yüksek miktarda hidrojen ve karbon ve düşük miktarda oksijen sülfür ve nitrojen barındırmaktadır. Reçineler katı veya yarı katı halde olup polar yapıdadırlar. Bu sebeple kuvvetli adezyona sahiptirler. Aromatikler, viskoz yağ şeklindedirler ve molekül ağırlıkları çok düşüktür. Bitümün %40-65'ini



aromatikler oluşturmaktadır. Apolar karbon zincirlerinden oluşturmaktadırlar ve doymun olmayan yapıda olmaları sebebiyle yüksek molekül ağırlığına sahip hidrokarbonları çözme eğilimindedirler. Doymuş hidrokarbonlar ise renksiz olup apolar yapıda viskoz yağ şeklindedirler ve bitümüm %5-20'sini oluşturmaktadırlar. Atmosferik ve vakum distilasyonu bitüm içerisindeki hafif bileşenleri yani doymuş ve asfalten yoğunluğunu azalmakta iken, hava üflenmesi asfalten miktarını artırarak aromatik miktarını düşürmektedir. Bitümün yapısındaki dağılımlarına göre asfalten ve malten bileşenleri, bitümün karakteristiğini etkilemektedir. Kimyasal bileşen ile penetrasyon indeksi arasındaki ilişki Şekil 3.2'de verilmiştir. Bitümün yapısındaki değişim büyük ölçüde üstyapı için üretilen karışımın hazırlanması ve serilmesi işlemleri sırasında meydana gelmekte ve zamanla devam etmektedir [26], [27], [28].



Şekil 3.2: Kimyasal bileşen ile penetrasyon indeksi arasındaki ilişki [27].

BSK kaplamalı yolların ömrünü, dolayısıyla hizmet seviyesi ve maliyetini karışımda kullanılan bitümlü bağlayıcının özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Yol üstyapılarında görülen yapısal bozulmalar büyük ölçüde kullanılan bitümlü bağlayıcı içinde veya temas yüzeyinde ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda tekerlek izinde oturma şeklinde görülen bozulmalar viskoz hale geçen bitümün kaplama tabakasının boşluklarına doğru akışı şeklinde olurken, orta sıcaklıklarda boyuna yönde ve/veya timsah sırtı şeklinde, düşük sıcaklıklarda ise enine yönde gelişen çatlaklar sertleşen bitümün kendi içerisinde veya temas yüzeyinden kırılmasıyla ortaya çıkmakta, yine sudan kaynaklanan soyulma ve sökölme şeklinde bozulmalar

da bitümün agrega temas yüzeyindeki yapışkanlığını kaybetmesine bağlı olarak meydana gelmektedir. Farklı sıcaklıklarda farklı şekilde görülen bu bozulmalar bitümlü bağlayıcıların visko-elastik davranış özelliği nedeniyle oluşmaktadır. Bitümlü bağlayıcılar değişen sıcaklık ve yük koşullarına bağlı olarak sabit ve kararlı bir reolojik davranış göstermeyip, yüksek sıcaklık ve uzun süreli yükleme durumlarında viskoz bir sıvı gibi davranırken, düşük sıcaklıklarda sert, elastik bir katı gibi davranmaktadır [29].

Bölge sıcaklığı başta olmak üzere trafik hacmi, trafik hızı, eğim gibi etkenler göz önüne alınarak seçilmesi gereken bitüm sınıfı aralıklarına ait özellikler Çizelge 3.1’de TS EN 12591 kaplama sınıfı bitümler standardına göre verilmiştir.

Çizelge 3.1: Kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri [30].

Özellik	Deney standardı	Birim	Bitüm sınıfları		
			40/60	50/70	70/100
Penetrasyon	TS EN 1426	0,1 mm	40-60	50-70	70-100
Yumuşama noktası	TS EN 1427	°C	48-56	46-54	43-51
İnce film halinde ısıtma 163°C	TS EN 12607-1				
<i>Kalıcı penetrasyon</i>		%	≥ 50	≥ 50	≥ 46
<i>Yumuşama noktası yükselmesi 1</i>		°C	≤ 9	≤ 9	≤ 9
<i>Yumuşama noktası yükselmesi 2^a</i>		°C	≤ 11	≤ 11	≤ 11
<i>Kütle değişimi</i>		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8
Parlama noktası	EN ISO 2592	°C	≥ 230	≥ 230	≥ 230
Penetrasyon indeksi	-	-	-1,5/+0,7	-1,5/+0,7	-1,5/+0,7
Dinamik viskozite 60°C	EN 12596	Pa . s	≥ 175	≥ 145	≥ 90
Fraass kırılma noktası	EN 12593	°C	≤ -7	≤ -8	≤ -10
Kinematik viskozite 135°C	EN 12595	mm ² / s	≥ 325	≥ 295	≥ 230

^a: 2. seviye seçilmesi halinde penetrasyon indeksi ve Fraass kırılma noktası deneyi yeni bitüm ile yapılmaz.

Bitümün inşaat amaçlı kullanımı için sıvılaştırılması gerekmektedir. Sıvılaştırma, bitümün ısıtılması ile elde edilebildiği gibi bitümün belirli petrol çözücüler içinde çözünmesi veya bir emülgatör veya su ile emülsiyon haline getirilmesi ile elde edilebilmektedir. Petrol çözücüler ile sıvılaştırılmış bitüm, sıvı petrol asfalt; emülsiyon haline getirilerek sıvılaştırılmış bitüm, asfalt emülsiyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu tip bitümlü bağlayıcılar yüzeysel kaplama yapımında kullanılmaktadır. Sıvı petrol asfaltlarında ve su emülsiyonlarında, sıvı bitüm karışımı

belirli bir sıcaklıkta yüzeye döküldükten sonra bitüm karışımı içerisindeki çözücü madde buharlaşmakta ve bitüm bağlayıcı özellik göstererek agregaları kaplamaktadır. Asfalt emülsiyonlarının ve sıvı petrol asfaltlarının soğuk agrega karışımı ile kullanılabilmesi ve püskürtülerek uygulanmaları nedeniyle kaplamanın üretimi için daha az enerji gerektirmektedir. Asfalt emülsiyonu veya sıvı petrol asfalt ile yapılan yüzeysel kaplama, inşaatı için gereken enerji miktarı ile bitümlü sıcak karışımlara göre avantaj sağlamaktadır [31].

3.2 Agregalar

Agrega yol stabilitesinden sorumlu olduğu kadar miktar olarak da önemli bir paya sahiptir. Bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının tamamı, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'i, beton kaplamaların ağırlıkça %70-80'i agregalar tarafından sağlanmaktadır. Hem kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı hem de çok büyük miktarda gereksinin duyulmasından dolayı agrega önemli bir yol malzemesidir [7].

Agregalar kökenlerine ve boyutlarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Kökenlerine göre agregalar; doğal agrega, yapay agrega ve geri kazanılmış agregadır. Doğal agregalar nehirlerden, denizlerden, çöllerden, eski göl, dere yataklarından ve taş ocaklarından kırılmamış veya kırılmış olarak elde edilen yoğun yapılı agregalardır. Bu agregalar doğal olarak oluşmuş kayalardan fiziksel yolla doğrudan doğruya elde edilirler. Yapay agregalar yüksek fırın cürufu, izabe cürufu veya yüksek fırın cürufu gibi sanayi ürünü olan kırılmamış veya kırılmış yoğun yapılı agregalardır. Bu agregalar endüstriyel işlemler sonucunda elde edilmektedirler. Geri kazanılmış agrega, daha önce yapıda kullanılmış ve işleminden geçirilerek yeniden elde edilen agregadır. Boyutlarına göre agregalar; ince agregalar, iri agregalar ve filler olarak üçe ayrılmaktadır. İri agregalar, kırmataş, çakıl veya bunların karışımından elde edilen ve 4 nolu elekten üstünde kalan malzemelerdir. İnce agregalar, doğal kum, kırnakum veya bunların karışımından elde edilen 4 nolu elekten geçen, 200 nolu elekten üzerinde kalan malzemelerdir. Filler ise çoğunluğu 0.063 mm göz aralıklı elekten geçen ve tamamı 0.25 mm'den daha küçük boyutta olup ince malzemedir [32].

Agrega dane biçimleri yol kapmalalarında kullanılan karışımların sıkışma direncini, işlenebilirliğini, yoğunluğunu, stabilitesini, kenetlenmesini ve kayma mukavemetini etkilemektedir. Agregalar iki boyutlu biçim sınıflandırmasında; yuvarlak, yarı yuvarlak, yarı köşeli ve köşeli olarak tanımlanmakta ve üç boyutlu sınıflandırmada küresel, kübik, yassı ve ince uzun olarak ayrılmaktadır. Yol inşaatlarında sıkışma direnci yüksek ancak sıkıştırıldıklarında yüksek stabilite gösteren köşeli agregalar kullanılmalıdır. Agregaların yüzey yapıları çok pürüzlü, pürüzlü, düzgün ve cilalı olarak dört grupta ifade edilmektedir. Danelerin yüzey pürüzlülüğü fazla ise işlenebilirlik azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti ve bitüm ile adezyon kuvveti artmaktadır. Agrega danelerinin içersindeki boşluklar porozite ile ifade edilmektedir. Bu boşluklar bitümlü sıcak karışım hazırlanması esnasında bitüm ile dolarak adezyon kuvveti oluşturmaktadırlar. Yeterli poroz agregalar stabilitenin artmasına ve bağlayıcı film ile arasındaki kuvvetli adezyon sayesinde soyulmaya karşı direnç göstermektedir [7].

Agregaların özellikleri değişiklik göstermektedir. Esnek veya rijit kaplama yapımında yük taşıma, bağlayıcı ile adezyon yapma, drenaj gibi farklı gereksinimlere ihtiyaç duyulduğu için kaplama katmanlarında kullanılan agregalarda aranan özellikler farklı olmaktadır.

3.2.1 Alttemel tabakasında kullanılan malzemeler

Trafik yüklerinin taban zemini üzerine yayılmasını sağlamak, taban zemininin bünyesinde bulunan ince danelerin temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek ve ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon görevi yapmak üzere; belirli bir granülometride hazırlanan agreganın optimum su yüzdesinde karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış dolgu veya yarmadan oluşan taban zemini üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılması ile oluşturulan tabaka alttemel tabakasıdır. Alttemel malzemesi inşaat ve tesviyesi tamamlanarak hazırlanmış taban zemini üzerine, sıkışmış kalınlığı 20-30 cm kalınlığındaki tabakalar halinde serilmektedir. Alttemel tabakası genellikle dona hassas olan taban zeminlerinde, taban zemininde oluşan buz merceklerinin yukarıdaki tabakalara doğru yükselmesi sonucu oluşacak don kabarmasını önlemek için yapılmaktadır. Alttemel tabakasında özellikle granüler

malzemeler kullanıldığından dolayı agregaların önemi oldukça fazladır. Çakıl ve kırmataş alttemellerde, dona hassas olmayan malzeme kullanılmaktadır. 0,02 mm'den küçük dane miktarı %3'ten fazla olmamalı ve en büyük dane boyutu çakıl için 63,5 mm kırmataş için 76 mm'yi aşmamalıdır. Alttemel tabaka granülometri limitleri Tip A ve Tip B olmak üzere iki sınıftır. Bu sınıflara ait limitler Çizelge 3.2'de verilmiştir [6], [16].

Çizelge 3.2: Alttemel malzemesi gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen	
mm	inç	Tip A	Tip B
75	3	100	
50	2	-	100
37,5	1 ½	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	¾	70 - 10	45 - 80
9,5	¾	45 - 80	30 - 70
4,75	No.4	30 - 75	25 - 55
2,00	No.10	-	15 - 40
0,425	No.40	10 - 25	10 - 20
0,075	No.200	0 - 12	0 - 12

Alttemel tabakasında kullanılacak malzemelerin fiziksel özelliklerinin Çizelge 3.3'de verilen sınırlar dahilinde olması istenmektedir.

Çizelge 3.3: Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri [33].

Deney adı		Deney standardı	Şartname limitleri
Hava tesirine karşı dayanıklılık, %		TS EN 1367-2	≤ 25
Parçalanma direnci, %		TS EN 1097-2	≤ 45
Yassılık indeksi, %		BS 812	35
Su emme, %		TS EN 1097-6	≤ 3,5
Likit limit, %		TS 1900-1	≤ 25
Plastisite indeksi, %		TS 1900-1	≤ 6
Kil topağı ve dağılabilen dane oranı, %		ASTM C142	(İri malzeme) ≤ 2
Organik madde		TS EN 1744-1	Negatif
Metilen mavisi g/kg	İnce agrega		≤ 5,5
	Öğütülmüş magmatik agrega	TS EN 933-9	≤ 5,5

Alttemel tabakasının sıkıştırılması çalışma ağırlığı en az 11.000 kg statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den büyük, iki frekanslı vibrasyon sistemli düz bandajlı silindirler ve/veya lastik başına düşen yükü 3.500 kg'den az olmayan lastik tekerlekli silindirler ile yapılmaktadır. İstenilen alttemel sıkıştırma kriterleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4: Alttemel sıkıştırma kriterleri [33].

	Kriter	Deney standardı	Şartname limitleri
Tip A	Sıkışma, minimum %	Modifiye Proctor TS 1900-1	96
	Optimum su içeriği %	Modifiye Proctor TS 1900-1	$W_{opt} \pm 2$
Tip B	Sıkışma, minimum %	Modifiye Proctor TS 1900-1	98
	Sıkışma, minimum %	Titreşimli tokmak TS 1900-1	95
	Optimum su içeriği %	Modifiye Proctor TS 1900-1	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$
	Optimum su içeriği %	Titreşimli tokmak TS 1900-1	$W_{opt} \pm 1$

3.2.2 Temel tabakasında kullanılan malzemeler

Temel tabakalarında kullanılan olan kaba agregası; çakıl, kırılmış çakıl, teras çakılı, kırmataş, kırılmış cüruf veya benzeri malzemeler olabilmektedir ancak bu malzemelerin Çizelge 3.5'de verilen yeter koşulları sağlamaları gerekmektedir.

Çizelge 3.5: Kaba agreganın fiziksel özellikleri [33].

Deney adı	Deney standardı	Şartname limitleri
Hava tesirine karşı dayanıklılık, %	TS EN 1367-2	≤ 20
Parçalanma direnci, %	TS EN 1097-2	≤ 35
Yassılık indeksi, %	BS 812	30
Su emme, %	TS EN 1097-6	$\leq 3,0$
Kil topağı ve dağılabilen dane oranı, %	ASTM C142	$\leq 1,0$
Organik madde	TS EN 1744-1	Negatif

İnce agregası ise doğal kum, ince çakıl, taş tozu, cüruf kumu veya benzeri malzemeler ya da bu malzemelerin karışımlarından oluşabilmektedir. Temel yapımında kullanılacak olan malzemenin ince kısmı Çizelge 3.6'da verilen özelliklere uygun olmalıdır.

Çizelge 3.6: İnce agreganın fiziksel özellikleri [33].

Deney adı		Deney standardı	Şartname limitleri
Likit limit, %		TS 1900-1	NonPlastik
Plastisite indeksi, %		TS 1900-1	NonPlastik
Organik Madde		TS EN 1744-1	Negatif
Metilen	İnce agrega	TS EN 933-9	$\leq 4,5$
mavisi,	Öğütülmüş		$\leq 4,5$
g/kg	magmatik agrega		

Temel tabakaları granüler temel, plentmiks temel ve çimento bağlayıcılı temel olarak yapılabilmektedirler. Granüler temel, belirli fiziksel özelliklere ve gradasyona sahip agreganın optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra silindirler ile maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılması sonucu elde edilen stabil bir temel tabakasıdır. Granüler temel için gradasyon Tip A, Tip B ve Tip C olarak ayırlmaktadır. Asfalt betonu ile kaplanması yapılacak yollarda ve sathi kaplamalı devlet yollarında Tip A veya Tip B, sathi kaplamalı il yollarında ise Tip A, Tip B veya Tip C tipi malzemeler kullanılabilmektedir. Gradasyon limitleri Çizelge 3.7’de verilmiştir [7], [33].

Çizelge 3.7: Granüler temel tabakası gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen		
mm	inç	Tip A	Tip B	Tip C
50	2	100		
37,5	1 ½	80 - 100	100	
25	1	60 - 90	70 - 100	100
19	¾	45 - 80	60 - 92	75 - 100
9,5	¾	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4,75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0,425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0,075	No.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

Granüler temel malzemesi yapımı, sıkıştırılması ve yüzey düzgünlüğü tamamlanmış, gerekli eğim verilmiş attemel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma sonucunda elde edilmesi gereken uygun değer Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8: Granüler temel tabakası sıkışma kriterleri [33].

Kriter	Deney standardı	Şartname limitleri
Sıkışma, minimum %	Modifiye Proctor TS 1900-1	98
	Titreşimli tokmak TS 1900-1	95
Optimum su içeriği %	Modifiye Proctor TS 1900-1	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$
	Titreşimli tokmak TS 1900-1	$W_{opt} \pm 1$

Plentmiks temel, granüler temel tabakasında olduğu gibi, belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelendirilmiş bir gradasyona sahip agreganın plentte optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilir. Plentmiks temelde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane grubu boyutu Çizelge 3.9’da verilen gradasyon limitleri içerisinde kullanılmalıdır [7].

Çizelge 3.9: Plentmiks temel tabakası gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen	
mm	inç	Tip I	Tip II
37,5	1 ½	100	
25	1	72 - 100	100
19	¾	60 - 92	80 - 100
9,5	¾	40 - 75	50 - 82
4,75	No.4	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	20 - 45	23 - 50
0,425	No.40	8 - 25	12 - 30
0,075	No.200	0 - 10	2 - 12

Plentmiks temel tabakasının serimi finişer ile yapılmalıdır ve bir seferde sıkıştırılan tabakanın sıkıştırılmış tabaka kalınlığı 20 cm’den fazla olmamalıdır. Sıkıştırma Çizelge 3.10’deki değerleri sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

Çizelge 3.10: Plentmiks temel tabakası sıkışma kriterleri [33].

Kriter	Deney standardı	Şartname limitleri
Sıkışma, minimum %	Modifiye Proctor TS 1900-1	100
	Titreşimli tokmak TS 1900-1	97
Optimum su içeriği %	Modifiye Proctor TS 1900-1	$(W_{opt} - 1) - W_{opt}$
	Titreşimli tokmak TS 1900-1	$W_{opt} \pm 0,5$

Çimento stabilizasyonlu temel, belirli fiziksel şartları sağlayan ve Çizelge 3.11’de belirtilen gradasyona sahip agregaya belirli oranda çimento katılarak, optimum su içeriğinde plentte karıştırılarak elde edilen temel tipidir.

Çizelge 3.11: Çimento stabilizasyonlu temel tabakası gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen
mm	inç	
37,5	1 ½	100
25	1	72 - 100
19	¾	60 - 92
9,5	¾	40 - 75
4,75	No.4	30 - 60
2,00	No.10	20 - 45
0,425	No.40	8 - 25
0,075	No.200	0 - 10

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasının serme ve sıkıştırma işlemlerinin belirli bir süre içerisinde tamamlanması gerekmektedir. Normal portland çimentoları kullanılarak yapılan karışımın, karıştırıcıdan çıkışından itibaren naklinin, serilmesinin, sıkıştırılmasının ve reglajının 2 saat içerisinde bitirilmesi gerekmektedir [33].

Bitümlü temel tabakası, Çizelge 3.12’de belirtilen gramülometri sınırları içinde kırılmış kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin plentte sıcak bitümlü bağlayıcı ile karıştırılması ile elde edilmektedir.

Çizelge 3.12: Bitümlü temel tabakası gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen	
mm	inç	Tip A	Tip B
37,5	1 ½	100	100
25	1	72 - 100	80 - 100
19	¾	60 - 90	70 - 90
12,5	1/2	50 - 78	61 - 81
9,5	¾	43 - 70	55 - 75
4,75	No.4	30 - 55	42 - 62
2,00	No.10	18 - 42	30 - 47
0,425	No.40	6 - 21	15 - 26
0,180	No.80	2 - 13	7 - 17
0,075	No.200	0 - 7	1 - 8

Bitümlü temel tabakasında kullanılan agrega kırmataş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından oluşması istenmektedir. Karışım içindeki kırmataşın veya kırma çakılın temiz, sert, sağlam ve dayanıklı daneler olması ve kil topakları, bitkisel maddeler ve

diğer zararlı maddelerden arındırılmış olması gerekmektedir. Karışımı oluşturan kaba agregaya ait fiziksel özellikler Çizelge 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.13: Kaba agreganın fiziksel özellikleri [33].

Deney adı	Deney standardı	Şartname limitleri
Hava tesirine karşı dayanıklılık, %	TS EN 1367-2	≤ 18
Parçalanma direnci, %	TS EN 1097-2	≤ 30
Aşınma direnci, %	TS EN 1097-1	≤ 25
Yassılık indeksi, %	BS 812	30
Kırılmışlık, ağırlıkça %	TS EN 933-5	$\geq 95 - \leq 0$
Soyulma mukavemeti, % bitümle kaplı yüzey	TS EN 12697-11	≥ 60
Su Emme, %	TS EN 1097-6	$\leq 2,5$
Kil topağı ve dağılabilen dane oranı, %	ASTM C142	$\leq 0,3$

İnce agreganın üretildiği malzemin parçalanma direnci ve hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerleri Çizelge 3.11’de verilen kaba agreganın değerlerine uygun olması istenmektedir. Karışımında ince agrega olarak kullanılabilecek doğal kum, ince agreganın Çizelge 3.14’te verilen fiziksel özelliklerine sahip olması gerekmektedir.

Çizelge 3.14: İnce agreganın fiziksel özellikleri [33].

Deney adı	Deney standardı	Şartname limitleri
Plastisite indeksi, %	TS 1900-1	NonPlastik
Organik Madde	TS EN 1744-1	Negatif
Su Emme, %	TS EN 1097-6	$\leq 2,5$
Metilen İnce agrega		$\leq 3,5$
mavisi, Ögütülmüş	TS EN 933-9	$\leq 3,5$
g/kg magmatik agrega		

Bitümlü temel tabakasının yapımı için agregaya ilave edilen bitümlü bağlayıcının Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar Kaplama Sınıfı Bitümler Özellikleri TS EN 12591 standardına uygun olarak 40/60, 50/70 veya 70/100 penetrasyon sınıflarında bitümler kullanılmaktadır. Bitümlü temel karışım tasarımı “Asphalt Institue MS-2” el kitabına göre ve Marshall tasarım yöntemi kullanılarak Çizelge 3.15’te verilen standartlar uygulanarak şartname limitlerini sağlayacak şekilde yapılmaktadır.

Çizelge 3.15: Bitümlü temel dizayn kriterleri [33].

Özellikler	Deney standardı	Min.	Maks.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	TS EN 12697-30	75	
Marshall stabilitesi, kg	TS EN 12697-34	600	-
Boşluk, %	TS EN 12697-8	4	6
Bitümle dolu boşluk, %	TS EN 12697-8	55	75
Agregalar arası boşluk, %	TS EN 12697-8	12	14,5
Akma, mm	TS EN 12697-34	2	5
Bitüm, ağırlıkça %	TS EN 12697-1	3,0	5,5
Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci, indirekt çekme mukavemeti oranı, min. %	AASHTO T 283	80	-

Bitümlü sıcak karışımlar harman tipi karıştırma plantlerinde veya tambur tipi karıştırma plantlerinde kontrollü sıcaklıklarda hazırlanmaktadır. Uygun karışım sıcaklığı altında hazırlanan karışımda bitüm yeterli akışkanlığa sahip olamadığı için agrega yüzeyleri yeterli bitüm ile kaplanmaz iken uygun karışım sıcaklığının üstündeki sıcaklıkta bitümün yapısı bozulmakta ve kaplamanın performansı etkilenmektedir. Agreganın sıcaklığı ile bitüm sıcaklığı arasındaki farkın 15°C'den fazla olmaması istenmektedir. Bitümlü bağlayıcı sınıfına göre uygun bitüm ve agrega sıcaklıkları Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16: Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları [33].

Bitümlü bağlayıcı penetrasyon sınıfı	Bitüm		Agrega	
	Min. °C	Maks. °C	Min. °C	Maks. °C
40/60, 50/70	145	160	150	165
70/100	140	155	145	160

Sıkıştırma işlemi, karışımın yola serilmesinden hemen sonra, karışımın sıcaklığı 130°C'nin üstündeyken başlanması ve sıkıştırma işlemi karışım sıcaklığı 80°C'nin altına düşmeden tamamlanması gerekmektedir. Sıkıştırma işleminde statik ağırlığı 8-12 ton arasında demir bandajlı silindirler ile lastik basıncı ayarlanabilen minimum 20 tonluk lastik tekerlekli silindirler kullanılmalıdır.

3.2.3 Kaplama tabakasında kullanılan malzemeler

Beton asfalt, sürekli gradasyona sahip kaba agrega, ince agrega ve mineral filler karışımı ile bitümlü bağlayıcının karıştırılması ile oluşan kenetlenmiş yapıdaki kaplama türüdür. Kenetlenmiş agrega yapısı, serilen kaplamanın sağlamlığını ve

performansını belirleyen önemli etkenlerden birini oluşturmaktadır. Beton asfalt, binder tabakasını, aşınma tabakasını veya her ikisini birden kapsamaktadır. Binder tabakası ve aşınma tabakasına ait gradasyon limitleri sırasıyla Çizelge 3.17 ve Çizelge 3.18’de verilmiştir [34].

Çizelge 3.17: Binder tabakası gradasyon limitleri [33].

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

Aşınma tabakası üç tipe ayrılmıştır. Tip 3, çok ince aşınma tabakası olarak uygulanmaktadır. Tip 3 aşınma tabakasının amacı, kaymaya karşı direnci arttırmak, kaplamaya su girişini önlemek, en fazla 6 mm derinliğe kadar tekerlek izi oluşmuş mevcut bitümlü sıcak karışım tabakaları üzerine 25-30 mm kalınlıklarda uygulanarak yeni bir aşınma tabakası oluşturmaktır.

Çizelge 3.18: Aşınma tabakası gradasyon limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen		
mm	inç	Tip 1	Tip 2	Tip 3
19	3/4	100		
12,5	1/2	88 - 100	100	100
9,5	3/8	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6,0	1/4	-	-	25 - 33
4,75	No.4	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2,00	No.10	25 - 35	36 - 53	20 - 27
0,425	No.40	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0,180	No.80	7 - 14	8 - 16	
0,075	No.200	3 - 8	4 - 8	7 - 11

Agrega kırmataş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından oluşmalıdır. Karışım içindeki kırmataş veya kırma çakıl temiz, sert, sağlam ve dayanıklı danelerden

oluşup bütün malzemede kil topakları, bitkisel maddeler ve diğer zararlı maddeler bulunmamalıdır. Agregada sülfat, klorit ve hava etkisi ile kırılmaya yatkın olan ayrışma ürünü diğer maddeler bulunmamalıdır. Karışıma giren kaba agreganın kübik ve keskin köşeli yapıda olarak, 4 nolu elek üzerinde kalan kısmının en az %95'inin tüm yüzeyleri kırılmış olmalı, hiçbir yüzeyi kırılmamış agrega bulunmamalı ve Çizelge 3.19'da belirtilen koşulları sağlaması istenmektedir.

İnce agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olup plastisite indeksi sonucu non-plastik olması gerekmektedir. İnce agrega Çizelge 3.20'deki özelliklere ve ince malzemenin üretildiği malzemenin Çizelge 3.19'de belirtilen parçalanma direnci ve hava tesirine karşı dayanıklılık değerlerine uygun olması gerekmektedir.

Çizelge 3.19: Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri [33].

Deney adı	Deney standardı	Şartname limitleri	
		Binder	Aşınma
Hava tesirine karşı dayanıklılık, %	TS EN 1367-2	18	16
Parçalanma direnci, %	TS EN 1097-2	≤ 30	≤ 27
Aşınma direnci, %	TS EN 1097-1	≤ 25	≤ 20
Yassılık indeksi, %	BS 812	≤ 30	≤ 25
Kırılmışlık, ağırlıkça %	TS EN 933-5	≥ 95 - ≤ 0	
Cilalanma değeri, %	TS EN 1097-8	≥ 35	≥ 50
Soyulma mukavemeti, % bitümle kaplı yüzey	TS EN 12697-11	≥ 60	
Su Emme, %	TS EN 1097-6	≤ 2,5	≤ 2,0
Kil topağı ve dağılabilen dane oranı, %	ASTM C142	≤ 0,3	

Çizelge 3.20: İnce agreganın fiziksel özellikleri [33].

Deney adı	Deney standardı	Şartname limitleri	
		Binder	Aşınma
Plastisite indeksi, %	TS 1900-1	NonPlastik	
Organik Madde	TS EN 1744-1	Negatif	
Su Emme, %	TS EN 1097-6	≤ 2,5	≤ 2,0
Metilen	İnce agrega	≤ 3,5	
mavisi g/kg	Öğütülmüş magmatik agrega	≤ 3,5	
	TS EN 933-9		

Asfalt betonu aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregaya ilave edilmek suretiyle hazırlanan karışımda bitümlü bağlayıcı olarak Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar Kaplama Sınıfı Bitümler Özellikleri TS EN 12591 standardına uygun olarak 40/60, 50/70 veya 70/100 penetrasyon sınıflarında bitümler kullanılmaktadır. Tip 3 çok ince aşınma tabakası üretiminde TS EN 12591'e uygun bitümden polimer modifiye bitümler kullanılmaktadır. Asfalt betonunun karışım dizaynı "Asphalt Institute MS-2" el kitabına göre Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Çizelge 3.21'de binder, aşınma tip 1, tip 2 ve aşınma tip 3 tabakaları için dizayn kriterleri verilmiştir.

Sıkıştırma işlemi, karışımın yola serilmesinden hemen sonra, karışımın sıcaklığı 130°C'nin üstündeyken başlanması ve sıkıştırma işlemi karışım sıcaklığı 80°C'nin altına düşmeden tamamlanması gerekmektedir. Sıkıştırma işleminde statik ağırlığı 8-12 ton arasında demir bandajlı silindirler ile lastik basıncı ayarlanabilen tonluk lastik tekerlekli silindirler kullanılmalıdır. Sıkıştırma işleminde 6-10 tonluk demir bandajlı vibrasyonlu silindirler de kullanılabilir. Asfalt betonunun sıkışma kriterleri Çizelge 3.22'de verilmiştir.

Çizelge 3.21: Asfalt betonu dizayn kriterleri [33].

Özellikler	Deney standardı	Binder		Aşınma Tip 1, Tip 2		Aşınma Tip 3	
		Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	TS EN 12697-30	75		75		75	
Marshall stabilitesi, kg	TS EN 12697-34	750	-	900	-	400	-
Boşluk, %	TS EN 12697-8	4	6	3	5	5	12
Bitümle dolu boşluk, %	TS EN 12697-8	60	75	65	75	-	-
Agregalar arası boşluk, %	TS EN 12697-8	13	15	14	16	-	-
Akma, mm	TS EN 12697-34	2	4	2	4	2	4
Filler / Bitüm oranı		-	1,4	-	1,5		
Bitüm, ağırlıkça %	TS EN 12697-1	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0
Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci, indirekt çekme mukavemeti oranı, min. %	AASHTO T 283	80		80		80	
Tekerlek izinde oturma (30.000 devirde, 60°C'de), maks. %	TS EN 12697-22	-		8		-	

Çizelge 3.22: Sıkışma ve yüzey kalınlık özellikleri [33].

Özellikler	Binder tabakası	Aşınma tabakası	Çok ince aşınma tabakası
Sıkışma, işyeri karışım yoğunluğunun %'si			
tek değer	96	97	97
ortalama değer	98	98	98
Sıkışmış tabakanın hava boşluğu,			
ortalama % maks.	7	6	9
Sıkışmış tabakanın kalınlık (h) toleransı			
tek değer	$\pm 0,1 h$	$\pm 0,1 h$	$\pm 0,1 h$
ortalama değer	$h - (h + 0,1 h)$	$h - (h + 0,1 h)$	$h - (h + 0,1 h)$

4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ VE CÜRUF OLUŞUMU

4.1 Demir Çelik Üretimi

Sanayi sektörünün temel girdisi konumunda olan demir çelik üretimi ve tüketimi, günümüzde ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeylerine ilişkin temel ölçütlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ülkelerin sanayileşme süreçlerinin ayrılmaz bir parçası olan ve ülke ekonomilerinin kalkınmasında temel rol oynayan demir çelik sektörünün önemi, tüm endüstriyel dallara hammadde temin etmesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim demir çelik sektörü; inşaat, otomotiv, metal eşya, tarımsal makine, elektrikli ve elektriksiz makine, deniz ve motorlu kara ulaşım araçları, dayanıklı tüketim malları sanayileri gibi birçok sektöre girdi sağlamaktadır [35], [36].

Dünya genelinde 2 milyondan fazla insana doğrudan istihdam sağlayan demir çelik sektörü; inşaat, ulaşım, enerji sektörleri gibi ilişkili olduğu yan sanayilerde 50 milyondan fazla iş imkanı oluşturmaktadır. Sürekli olarak artış içinde olan yıllık üretim, Dünya ekonomisindeki değişimlerin etkisi ile dalgalanmalar gösterebilmektedir. 1970-2013 yılları arasında Dünya genelinde üretilen demir çelik miktarı Çizelge 4.1’de milyon ton cinsinden gösterilmiştir. [37]

Çizelge 4.1: Dünya geneli Demir-Çelik üretimi [37]

Yıl	Yıllık üretim (milyon ton)
1970	595
1975	644
1980	717
1985	719
1990	770
1995	753
2000	850
2005	1.148
2010	1.433
2011	1.537
2012	1.559
2013	1.606

Türkiye demir çelik üretiminde Dünya sıralamasında Almanya'dan sonra 8. sırada gelmektedir. Çizelge 4.2'de Dünya genelinde başlıca çelik üretimi yapan ilk 10 ülkenin 2012, 2013 yıllarında ait ham çelik üretim verileri verilmiştir [38].

Çizelge 4.2: Ham çelik üretim verileri [37].

Sıra	Ülke	Üretim (milyon ton)	
		2012	2013
1	Çin	731,0	779,0
2	Japonya	107,2	110,6
3	ABD	88,7	86,9
4	Hindistan	77,3	81,2
5	Rusya	70,4	68,7
6	Güney Kore	69,1	66,1
7	Almanya	42,7	42,6
8	Türkiye	35,9	34,7
9	Brezilya	34,5	34,2
10	Ukrayna	33,0	32,8

Altyapısı 1930'lu yıllarda atılan Türk demir çelik sektörü, ekonominin gelişmesinde ve endüstrileşmede önemli bir rol üstlenmiştir. Demir çelik üretimi ilk defa 1928 yılında, savunma sanayinin çelik ihtiyacını karşılamak amacıyla, şu anda Makine Kimya Endüstrisi Kurumu olarak bilinen tesiste, Kırıkkale'de başlamıştır. Çelik sektörüne ilişkin ilk yatırımlar, 1. ve 2. sanayi plânları kapsamında, 1930'lu yıllarda gerçekleştirilmiş ve sektör uzun yıllar kamu kesiminin tekelinde, entegre tesis ağırlıklı olarak gelişmiştir [39].

2013 yılı itibariyle sektörde kurulu olan 31 tesisin, 10'u Akdeniz bölgesinde, 9'u Marmara bölgesinde, 7'si Ege bölgesinde, 3'ü Karadeniz bölgesinde, 2'si de İç Anadolu bölgesinde yerleşiktir. 2013 yılı itibariyle, söz konusu tesislerden 12 tanesinin ham çelik kapasitesi 2 milyon ton ve üzerinde, 7 tanesinin kapasitesi 1-2 milyon ton arasında, 6 tanesinin kapasitesi 500 bin-1 milyon ton arasında ve 6 tanesinin kapasitesi de 50 bin-500 bin ton arasındadır. Şekil 4.1'de demir çelik üretim tesisleri ve yıllık kapasiteleri gösterilmiştir [40].



Şekil 4.1: Türkiye’deki demir çelik üretim tesisleri ve yıllık kapasiteleri [40].

Türkiye’deki çelik üretimi elektrik ark ocaklı ve bazik oksijen fırınlı tesislerde yapılmaktadır ve yapılan üretimin yaklaşık %75’i elektrik ark ocaklı tesislerde gerçekleşmektedir. Demir çelik üretimi Dünya ve ülke ekonomilerindeki değişimlerden etkilenmektedir. 2013 yılında kapasitesinin yaklaşık %70’i kadar üretim yapan Türkiye’nin, Çizelge 4.3’de 2000 ile 2013 yılları arasındaki üretim tesisi kapasiteleri ve üretim miktarları verilmiştir.

2000-2013 yılları arasındaki dönemde Türkiye’nin nihai mamûl tüketimi 13 milyon tondan 31 milyon tona ulaşmıştır. Uzun ürünler 2013 yılı itibari ile toplam tüketimin %53,3’ünü, yassı tüketimler ise %46,7’sini oluşturmaktadır.

Çizelge 4.3: Ham çelik kapasitesi ve üretimi [36].

Yıl	EOO kapasite	EOO üretim	BOF kapasite	BOF üretim	Toplam kapasite	Toplam üretim
(Bin Ton)						
2000	13.632	9.096	6.200	5.229	19.832	14.325
2010	33.385	20.905	9.350	8.238	42.735	29.143
2011	36.435	25.275	10.650	8.832	47.085	34.107
2012	38.385	26.560	10.650	9.325	49.035	35.885
2013	37.689	24.723	11.950	9.931	49.639	34.654

Türkiye’nin toplam çelik tüketiminin % 42 oranındaki önemli bir bölümü inşaat sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. İnşaat sektörünün çelik tüketimindeki payı açısından bakıldığında Türkiye gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkeler arasında

bir noktada yer almaktadır. İnşaat sektörünü % 24,6 oranındaki tüketimi ile makine, % 14,2 ile metal ürünler takip etmektedir. İnşaat sektörü Türkiye'nin toplam çelik tüketiminde belirleyici sektör konumunda bulunmaktadır. 2013 yılında Türkiye'de tüketici sektörlerin çelik tüketimindeki payı Çizelge 4.3'de verilmiştir [36].

Çizelge 4.4: Tüketici sektörlerinin 2013 yılında çelik tüketimindeki payı [36].

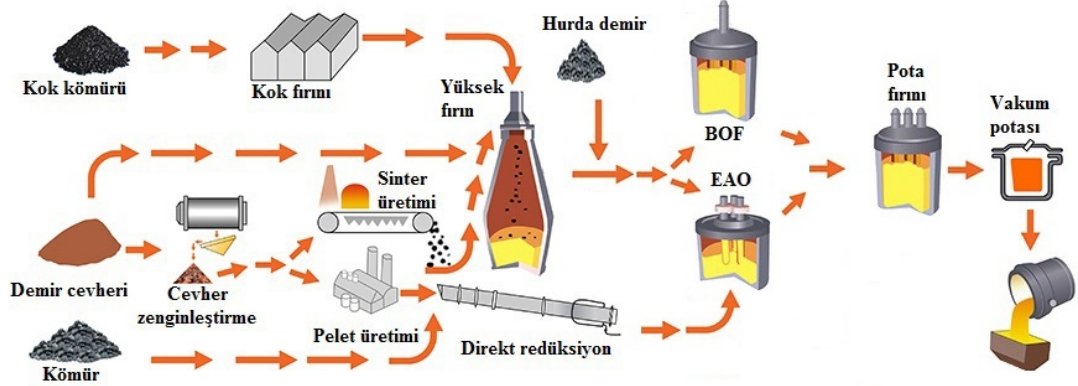
Tüketici sektörleri	% pay
İnşaat	42,0
Makine	24,6
Metal ürünler	14,2
Otomotiv	8,4
Elektrikli aletler	4,3
Ev aletleri	3,3
Diğer taşıma	3,2

Demir çelik sektörünün ana hammaddesi demir cevheridir. Demir elementinin kimyasal yapısı diğer elementlerle kolayca tepkimeye girmesine müsait olduğu için demir, doğada bileşik halinde bulunmaktadır. Bir demir madenin cevher olarak değerlendirilebilmesi için işletilmesinin ve kullanılmasının ekonomik olması gerekmektedir. Bu sebeple kullanılacak demir cevherlerinin harman tenörünün en az %57'sinin Fe olması arzu edilmektedir. Demir cevherleri kimyasal bileşiklerine göre dört grupta toplanmaktadır. Bunlar oksidik maden filizi hematit (Fe_2O_3) ve magnetit (Fe_3O_4), hidroksit maden filizi doğal hidratlı demir oksit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 - n\text{H}_2\text{O}$), sülfatlı maden filizi pirit (FeS_2) ve pirotin (FeS), karbonatlı maden filizi siderit (FeCO_3). Demir üretimi cevherden indirgeyerek yapıldığı gibi hurda demir çeliğin geri kazanımı ile de yapılmaktadır [41].

Hammadde besleme farklılığına göre çelik üretimi iki farklı gruba ayrılmaktadır. Bu tesislere entegre demir çelik tesisleri ve elektrik ark ocaklı tesislerler denilmektedir. Entegre tesislerde demir cevheri, çok az miktarda hurda, elektrik ark fırınlarında ise çelik hurdası temel hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca EAO'larına metalik demir ve direkt redüklenmiş metalikler eklenmektedir [42].

Entegre tesiste ilk önce yüksek fırında sıcak metal üretilmekte daha sonra kövertörlerde çeliğe dönüştürülmektedir. Hammadde olarak demir cevheri ve kireçtaşı, enerji kaynağı olarak kok kömürü ve bazen ilave olarak kömür

kullanılmaktadır. Elektrik ark tesislerinde çelik üretimi hurda metalin ve redüklenmiş metaliklerin karıştırılarak eritilmesi ile yapılmaktadır. Elektrik ark tesislerinde yalnızca hurda metal eritilerek de çelik üretimi yapılabilmektedir. Şekil 4.2’de entegre ve ark ocaklı demir çelik tesislerinde üretim akışı gösterilmiştir.

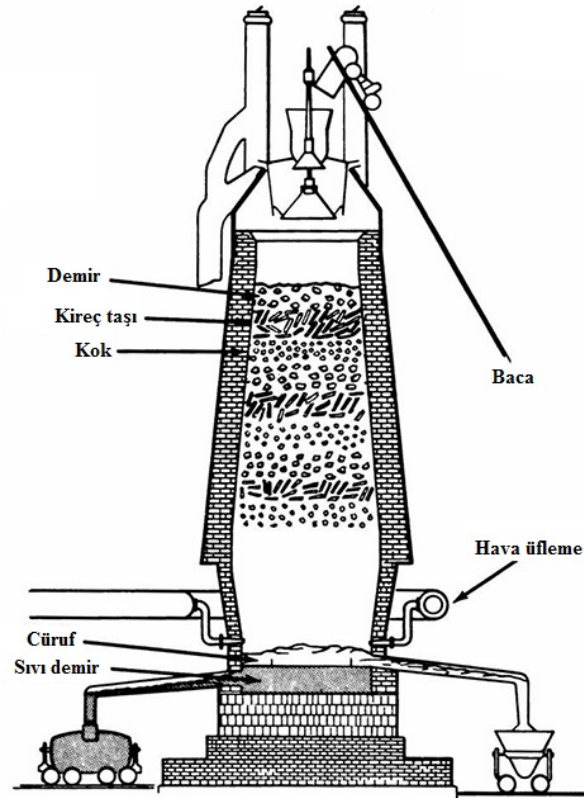


Şekil 4.2: Entegre ve ark ocaklı demir çelik tesislerinde üretim akışı [43].

4.1.1 Yüksek fırında demir üretimi

Demir cevherlerinin yaklaşık %97’si yüksek fırınlarda tüketilmektedir. Kalan kısmı ise direk redüklenmiş demir üretiminde kullanılır. Yüksek fırında demir üretimi yapımında demir içeren hammaddeler (cevher, sinter, pelet gibi), kireç taşı (CaCO_3) ve kok kömürü kullanılmaktadır. Kireç taşı, demir cevheri içindeki yabancı maddelerle reaksiyona girerek cüruf oluşturmakta ve saf demir elde edilebilmesini sağlamaktadır. Kok kömürü, yüksek karbon içeren bir kömür türü olup yüksek fırın içerisindeki ısıyı oluşturması ve yanma reaksiyonu sonucu oluşturduğu karbon monoksitin (CO) demir cevheri ile reaksiyona girmesi ile cüruf yapımını sağlaması için kullanılmaktadır. Hazırlanan karışım sürekli olarak yüksek fırına tepeden yüklenmektedir. Isınan ve eriyen cevherin fırının üstünden altına doğru akması fırın içerisindeki redükleyici gaz ile reaksiyon süresini arttırmaktadır. Fırının alt kısmından ise karışıma 1-1,5 atmosfer basıncında 600-1000°C arasındaki sıcaklıkta hava üflenerek kok kömürünün yanma hızını arttırılmakta ve alt bölgelerdeki redükleyici gaz miktarı çoğaltılmaktadır. 1 ton kok kömürü için 3000 m³ hava kullanılmaktadır. Bu aşamada karbon monoksit (CO) ile tepkimeye giren demir oksit (FeO) sonucu demir (Fe) ve karbon dioksit (CO_2) oluşmaktadır. Oluşan sıvı demir ve cüruf yüksek fırının en alt kısmında toplanmaktadır. Yüksek fırında demir oksidi redükleyen başka reaksiyonlarda kısmi olarak oluşabilmektedir. Bunun sebebi

yüksek fırın haznesinde toplanan demirin bünyesinde bulunan çok miktarda karbon (C), kükürt (S), fosfor (P), mangan (Mn) gibi hammaddelerde bulunan bazı elementlerdir. Cevherde bulunan silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi empüriteler redüklenerek cüruf oluşturmaktadırlar. Cüruf hafif olduğundan fırın haznesinin üst kısımda toplanmaktadır ve cüruf boşaltma deliği açılarak fırından tahliye edilmektedir. Yüksek fırın haznesinde toplanan demir zaman zaman boşaltılarak, kalıplara dökülüp döküm piki olarak piyasaya sürülmekte veya ergimiş halde çelikhaneye sevk edilerek çeliğe dönüştürülmektedir. Bu şekilde üretimin sürekliliği sağlanmaktadır. Kok sarfıyatı eski yıllarda bir ton ham demir için 1000 kg iken bugün, cevher hazırlama usullerindeki ilerlemeler ve yüksek fırının geliştirilmesi sonucu bu miktar bir ton ham demir için 650 kg'a düşürülmüştür. Yüksek fırına ait şema Şekil 4.3'de verilmiştir [42], [44], [45].



Şekil 4.3: Yüksek fırın şeması [45].

Çelik, içerisinde %1,7' ye kadar karbon, %1'e kadar mangan, %0,5'e kadar silisyum bulunan kükürt ve fosfor oranı da %0,05'ten az olan demir karbon alaşımıdır. Çelik üretimi sıvı ham demir içerisindeki karbonun ve diğer elementlerin tanımlanan

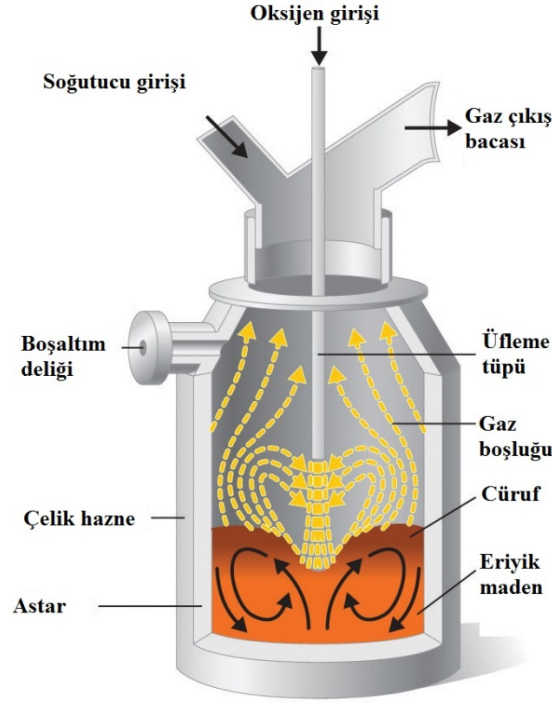
oranların altına indirgenmesi ile yapılmaktadır. Çelik üretimi için bazik oksijen fırını veya elektrik ark ocağı tesisleri kullanılmaktadır. Türkiye’de 2012 yılında toplam ham çelik üretimi içerisinde elektrik ark ocakların payı yüzde 74 oranında, bazik oksijen fırınlarının payı ise yüzde 26 seviyesinde gerçekleşmiştir. 2000-2012 yılları arasındaki dönemde elektrik ark ocaklarındaki üretim artışı yüzde 192, bazik oksijen fırınlardaki üretim artışı yüzde 78, toplam üretim artışı ise yüzde 151 oranında gerçekleşmiştir. Böylece, 2000 yılında yüzde 63,5 olan elektrik ark ocaklarının çelik üretimindeki payı 2012 yılında yüzde 74’e yükselirken, 2000 yılında yüzde 36,5 olan bazik oksijen fırınların üretim içindeki payı 2011 yılında yüzde 26’ya gerilemiştir [46], [47].

4.1.2 Bazik oksijen fırınında çelik üretimi

Entegre demir çelik fabrikalarında yüksek fırında demir cevheri eritilerek sıcak metal (pik) elde edilirken çelik, çelikhane ünitesinde üretilmektedir [48].

Oksijenle çelik üretimi işlemi; fırına şarj edilmiş sıcak metal ve beraberindeki hurdanın %99 saf oksijen kullanarak kısa sürede istenen karbon ve sıcaklıkta çelik haline getirilmesi işlemidir. Oksijen üfleme bölgelerine göre konverterler üstten oksijen üflemleri, alttan üflemleri ve kombine üflemleri tipleri olarak adlandırılmaktadır. Konverter bazik çalışma astarı ile örülüdür. Astar malzemesi manyezittir (MgO). Üstten üflemleri bazik oksijen fırınına ait şema Şekil 4.4’te verilmiştir.

Fırınlardan temel girdileri yüksek fırınlardan gelen sıcak metal, hurda ve oksijendir. Toplam şarjın % 70-85 ‘i sıcak metal, gerisi hurdadır. Yüksek fırından çelikhaneye pota veya torpidolarla getirilen sıvı ham demir, 180 tonluk vinçlerle 1300 ton kapasiteli mikserlere boşaltılmaktadır. Mikser; yüksek fırından gelen sıvı ham demirin depo edilmesini ve konvertörlerin kullanabileceği şartlara uygun homojen kompozisyon sağlamaktadır.



Şekil 4.4: Üstten üflemlili bazık oksijen fırını [49].

Konvertöre önce çelik hurdası, sonra da mikserlerden potalara alınan sıvı ham demir şarj edilmektedir. Sıvı ham demirin içindeki karbon, kükürt, silisyum, mangan ve fosfor gibi elementler, 17-20 dakika süreyle 4-4,5 m³/dakika debide oksijen üflenmesi ve kalsine kireç, dolomit, kok tozu gibi yardımcı malzemeler ilave edilmesi ile istenen değerlere düşürülmektedir. Oksijen sıvı metalde bulunan elementlerle reaksiyona girmekte ve bu reaksiyon ekzotermik (ısı verici) olup meydana gelen ısı banyodaki hurdayı eriterek metalin ısısını 1450'den 1650°C'ye çıkarmaktadır. Reaksiyon sonucu elde edilen yüksek ısı çelik hurdasının veya direkt redüklenmiş metallerin eritilmesi için kullanılmaktadır. Bu hammaddeler karışım ısısının kontrolü için de eklenebilmektedir. Üflenilen oksijen aynı zamanda demir, mangan, fosfor ile de reaksiyona girmektedir. Fakat oluşan ısı diğerlerine göre daha azdır. Karbonun oksijenle reaksiyona girmesiyle oluşan ana reaksiyon sonu CO gazının tekrar oksijenle reaksiyonu ile açığa çıkan ısı da tekrar sıvı banyosuna ısı katkısında bulunmaktadır. Sıvı ham demir içindeki karbon, kükürt, silisyum, fosfor değerleri istenen miktarlara düştükten sonra yaklaşık 1635 °C dolayında çelik olarak potalara alınmaktadır. Konvertör, eksenini etrafında döndürülerek ağzı aşağıya getirilmekte ve içindeki çeliğin potalara dökümü yapılmaktadır. Konvertöre ait örnek görsel Şekil 4.5'de verilmiştir. Sıvı çelik buradan ikincil metalurji istasyonuna

gönderilmektedir. Sonraki proses çeliğin katı forma dönüştürüldüğü sürekli döküm tesisleridir. Sürekli dökümlerde kare kesitli kütük veya yassı mamul yarı mamulu olan yaklaşık 2 metre genişliğinde slab üretilmektedir. Konverterde dökümden döküme geçen ortalama süre 40 dakika olup bunun yarısı oksijen üfleme süresidir [48], [50], [51].

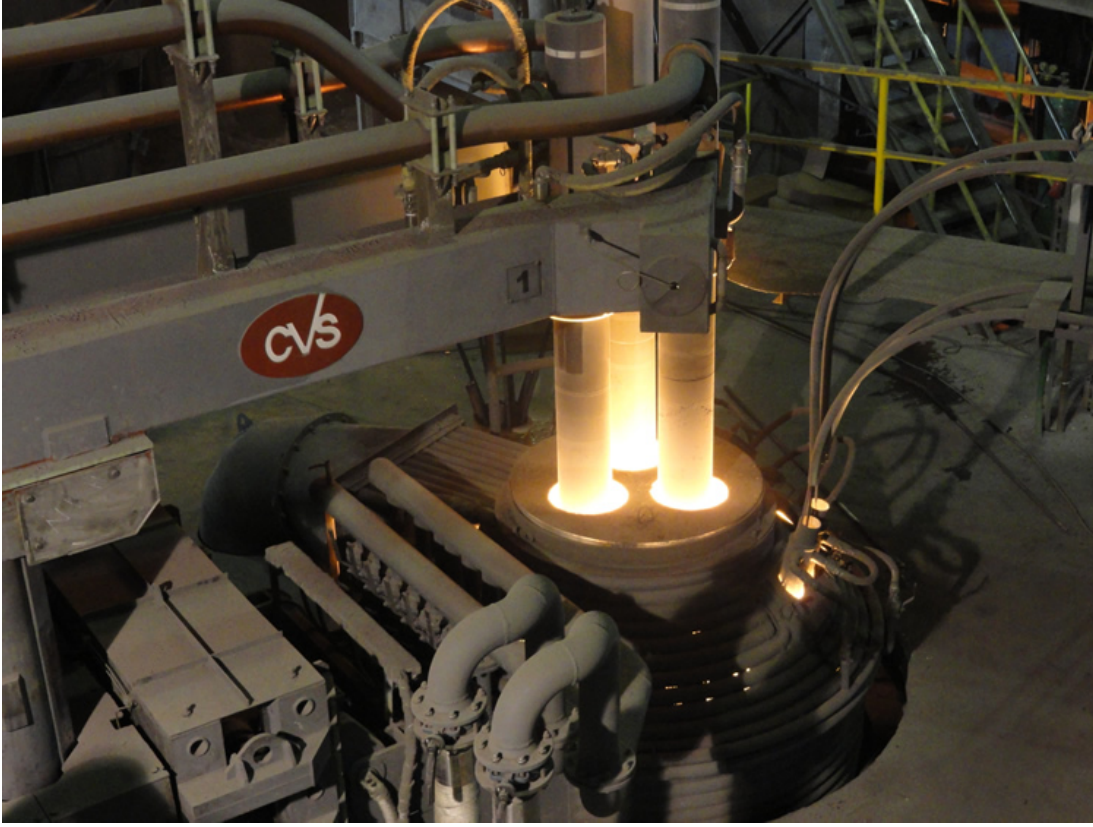


Şekil 4.5: Bazık oksijen fırını [52].

4.1.3 Elektrik ark ocağında çelik üretimi

Elektrik ark ocağı, elektrik enerjisinin çeşitli yollarla ısı enerjisinde dönüştürülmesi sonucunda çelik üretimi yapılan tesisdir. Elektrik ark fırınları elektrik akımının metali eritme yöntemine göre direkt ve indirek ark olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sanayi tesislerinde yoğun olarak kullanılan direkt ark fırınlarında, elektrik akımı grafit veya karbon elektrotlar metal karışımın içine indirilerek elde edilmektedir. Elektrotlara ait görsel Şekil 4.6’da verilmiştir. Oluşan elektrik akımı yüksek ısı açığa çıkararak metali eritmesinde kullanılmaktadır [42].

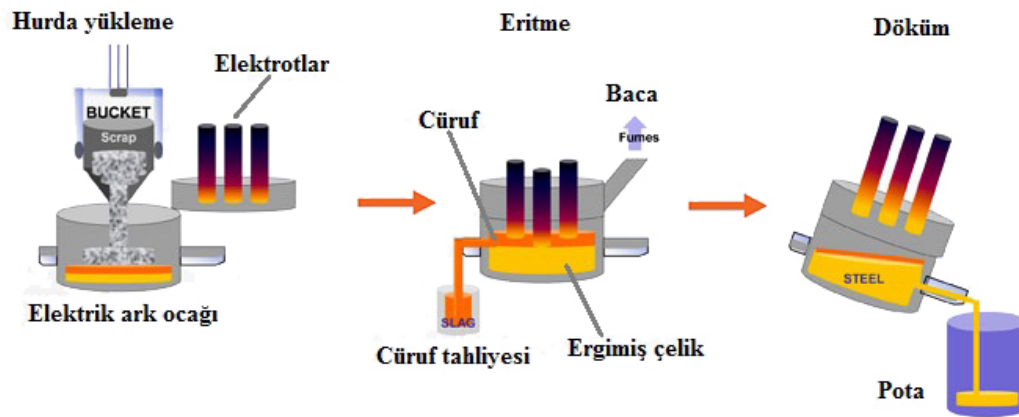
Günümüzde 350-400 ton kapasiteye ulaşabilen ve yüksek güçlü EAO tesisleri kurularak işletmeye alınmaktadır. Bu tesislerin birim zamanda ürettikleri çelik miktarı artarken diğer yandan fosfor ve kükürt gibi empüriteler çok düşük seviyelere düşürülebildiği için bu EAO tesisleri kaliteli çelik üretiminde önemli bir yöntemdir. 2013 yılında Dünya genelinde üretilen tüm çeliğin %71,9’u (1.185 milyon ton) bazık oksijen fırınlı tesislerde, %27,4’ü (452 milyon ton) ise elektrik ark ocaklı tesislerde üretilmiştir [38], [42].



Şekil 4.6: Elektrik ark ocağı elektrotları [53].

EAO'nda üretim hurda metalin fırına şarj edilmesi ile başlamaktadır. Fırın bir askı üzerinde durmaktadır ve elektrotların içinden geçtiği bir kapak ile kapatılmaktadır. Şarj kovasına konulan hurdalar ebat ve yoğunluklarına göre tabakalar halinde konulmaktadır. Bu işlem erimekte olan hurda içinde çökmeleri azaltarak elektrotları korumak ve çeliğin çeliğin hızlı formasyonunu sağlamaktır. Yükleme yapılan ocağın tavanı kapatılarak elektrotlar hurdanın üzerine indirilmektedir. Elektrotların hurda karışımı içine girebilmesi için üste yerleştirilmiş olan yumuşak hurdalara uygun voltaj verilerek ilk erime gerçekleştirilir. Bu aşamada toplam hurdanun yaklaşık %15'i erimekte. Birkaç dakika içinde hurda içine yerleşen elektrotlara yüksek voltaj verilmektedir ve sıvı metal havuzu oluşmaya başlamaktadır. Ergime başladığında ark değişken ve kararsızdır. Ergimiş havuz düzgün şekil aldıktan sonra ark denge durumuna gelmektedir. Denge durumu elde edildikten sonra ergimiş çelik üzerinde direkt olarak oksijen verilmektedir. Üflenilen oksijen banyo içerisindeki alüminyum, silis, magnezyum, fosfor, karbon ve demirle reaksiyona girmektedir. Oluşan tüm reaksiyonlar egzotermiktir ve ergime enerjisine ilave enerji vermektedirler. EAO'nda üretim prosesi sırasında sıvı çeliğin içerisindeki

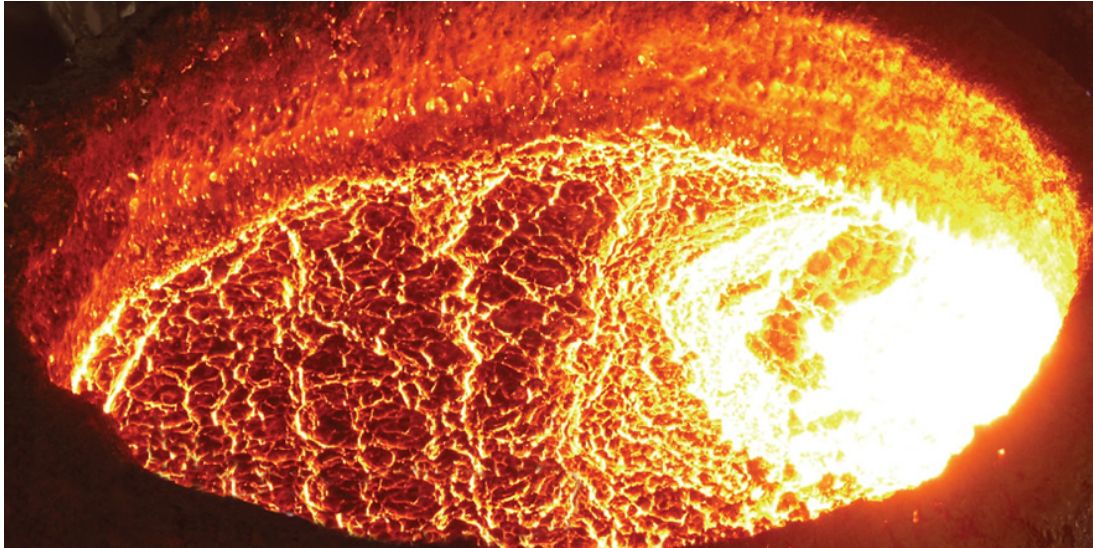
istenmeyen elementlerin toplanması amacıyla belirli miktarlarda kireç ilave edilmektedir. Çelik içerisinde istenmeyen bir element olan ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkileyen fosfor, rafinasyon sürecinde O_2 enjeksiyonu ile oksitlenerek kireç yardımıyla cürufa bağlanarak çelik içerisinden uzaklaştırılmaktadır. EAO, sadece hurdanın ergitilmesi ve fosfor rafinasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Rafinasyon süresini ve reaksiyonları hızlandırmak, banyo homojenliğini sağlamak amacıyla EAO tabanından üflenlen azot gazı (N_2) ile karıştırma yapılmaktadır. Yaklaşık $1610-1620^{\circ}C$ sıcaklığa erişen ve fosfor konsantrasyonu istenilen seviyeye düşen sıvı çelik, dipten döküm alma sistemi deliğinin açılması ile önceden $1000^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılmış ve refrakter tuğla döşenmiş pota içerisine boşaltılmaktadır. Dipten döküm alma sistemi, döküm sırasında ark ocağı cürufunun potaya kaçmasını engellemektedir. Cürufsuz döküm alma ile oksijen giderme ve katkı malzemeleri ile verim artarken pota ocağında gerçekleştirilen kükürt rafinasyonu da olumlu yönde etkilemektedir. Sıvı çelik potaya akarken kireç ve üretilen çelik cinsine göre gerekli miktarda katkı maddesi ilavesi yapılmaktadır. Döküm alma işleminin ardından EAO'na yaklaşık olarak 15 ton sıvı çelik bırakılarak, hem ocak cürufunun potaya kaçması önlenmekte, hem de bir sonraki dökümde şarj edilecek hurdaların daha kolay ergitilmesi sağlanmaktadır. EAO'nda çelik üretim işlem sırası Şekil 4.7'de gösterilmiştir [42], [54].



Şekil 4.7: EAO işlem sırası [55].

4.2 Demir Çelik Üretiminde Cüruf Oluşumu

Demir cevherleri doğada bu malzemelerin esasını oluşturan demiroksit bileşenlerinin yanısıra küçük bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi yabancı maddelerle birlikte bulunmaktadır. Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demir oksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin açığa çıkartılması gerekmektedir. Çelik üretiminde ise ham demir içerisindeki başta karbon olmak üzere belirli elementlerin indirgenmesi gerekmektedir. Erimiş metal banyosu içerisinde çeşitli tepkimelerin gerçekleşmesi sağlanarak istenmeyen elementler demirden uzaklaştırılmaktadır. Demirden ayrılarak yeni bağlar yapan bu elementler özkütle farkından dolayı erimiş metal banyosu içinde yüzeye çıkmaktadır. Yüzeyde toplanan, demir çelik sanayisinin atık maddesine cüruf denilmektedir. Erimiş metal banyosu yüzeyinde toplanan cürufa ait görsel Şekil 4.8’de verilmiştir. Her yıl 400 milyon tondan fazla çelik cürufu üretilmektedir. Bu cüruflar genel olarak silika, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alüminyum ve demir oksit karışımlarından oluşmaktadır. Cüruf, sıvı metal karışımında yüzeye çıkarak bir nevi kapak oluşturmakta ve sıvı metali dışarıdaki oksijenden korumakta, sıcaklığı muhafaza etmektedir [56], [57].



Şekil 4.8: Demir cürufu [58].

4.2.1 Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufları metalik olmayan ve içerisinde kireç, silis, alümin, demir, magnezi, manganoksit ve kükürt gibi maddeler barındıran ürünlerdir. Bu maddelerin cüruf içerisindeki yüzdeleri kullanılan hammaddenin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Yüksek fırın içerisindeki sıvı metal haznesinin yüzeyinde toplanan belli aralıklarla tahliye edilmektedir, bu işlemler sırasında cürufun sıcaklığı yaklaşık 1500°C'dir. Yüksek fırın cüruflarının gruplandırması, toplanan cürufun soğutma metoduna göre yapılmaktadır. Soğutma yöntemlerine göre cüruflar 3 grupta toplanabilir; hava soğutmalı cüruf, granüle cüruf ve genişmiş cüruf.

- Hava soğutmalı cüruf: Atmosferik koşullar altında bir çukur içerisinde yavaşca soğutulması, bu tip cürufun baskın olarak kristal bir materyal olmasına neden olmaktadır. Camsı fazı düşük olan bu malzeme büyük kütleler halinde soğumaktadır. Soğuk cürufun kazılması ve kırılması işlemlerinin ardından beton veya asfalt agregası ya da stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilmesi mümkün olmaktadır. Hava soğutmalı cürufun bağlayıcı özelliğinin çok az olması veya hiç olmaması nedeniyle mineral agrega olarak kullanılmaktadır.
- Granüle cüruf: Erimiş haldeki cüruf yüksek fırından çıktığında hızlı olarak soğutulduğu takdirde akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engellemekte ve kuma benzer camsı yapıda, hidrolik özelliği olan bir katı eriyik elde edilmesini sağlamaktadır. Hızlı soğutma cürufun doğrudan su içine daldırılması ile sağlanabildiği gibi günümüzde yaygın olarak su cüruf kütlesi 10'a 1 olacak şekilde basınçlı su püskürtülmesi ile yapılmaktadır ancak havanın ve suyun birlikte kullanıldığı farklı bir metotla da bu işlem yapılabilir. Bu metot, eriyik cürufun bir vibrasyon plakası üzerine dökülmesini ve bu işlemle genişleyen cürufa bir miktar su püskürtülmesi ile soğutulması, ardından dönen bir tambur üzerine dökülerek havaya fırlatılması ve çabuk soğutulmanın gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Soğutma işleminin hızı oluşan dane boyutlarını etkilemektedir. Bu malzeme değirmenlerde öğütülerek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu elde edilmektedir. Elde edilen bu malzeme yarı-kararlı camsı malzeme olup sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak ya da ince öğütülmek ve portland çimentosunun

hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi kullanmak suretiyle hidrolik özelliğe sahip olmaktadır.

- Genleşmiş cüruf: Sıcak cürufun kontrollü miktarda su ile soğutulması ile elde edilen cüruf türüdür. Bu işlem sırasında cürufun içerisinde buhar kalması nedeniyle genleşmeye uğrayan cüruflar gözenekli yapıya sahip olmaktadır. Bu yöntemde soğutma işleminin yeterince hızlı olmaması nedeniyle cürufa kristal yapı hakimdir ve hidrolik bağlayıcı özelliği bulunmamaktadır. Genleşmiş cürufların kırılmasıyla hafif agrega elde edilebilmekte ve hafif beton yapımı mümkün olabilmektedir [56], [59], [60], [61].

Şekil 4.9'da yüksek fırın cürufunun fırın içerisinden alınması, cüruf potası ile taşınarak soğutma çukuruna dökümü ve su ile soğutulmasına ait görseller verilmiştir.

4.2.2 Bazik oksijen fırını cürufu

Çelik cürufu bazik oksijen fırını üretiminde ve elektrik ark ocağı üretiminde ortaya çıkan cüruflardır. Üretimde, toplam sıvı çelik üretiminin yaklaşık yüzde 15 oranında cüruf oluşmaktadır. Çelik cürufu temel olarak kalsiyum oksit (CaO), demir (Fe), silisyum oksit (SiO_2), magnezyum oksit (MgO) ve manganez oksit (MnO) bileşenlerinden oluşmaktadır [57].

Bazik oksijen fırını ile ham demir ve hurda karışımı ile çelik üretimi işleminde cüruf, cüruf yapıcı kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaO}+\text{MgO}$) eklenmiş sıvı demir ve hurda karışımına doğrudan saf oksijen üflenmesi ile oluşmaya başlamaktadır. İlk olarak cüruf, çelik üretim sıcaklıklarında sıvının oksitlenmesi ile silisyum oksit halinde oluşmaktadır. Bu cüruf sıcak metal içerisindeki fosfor ve kükürdü bünyesine alarak tutmaktadır. Karışım içerisine saf oksijen üflenmesi ile fazla karbon yanarak sıvı çelikten uzaklaşmaktadır. Silisyum (Si), manganez (Mn) ve fosfor (P) gibi safsızlıklar da oksitlenmekte ve kireç sayesinde cürufta toplanmaktadır [42], [57].

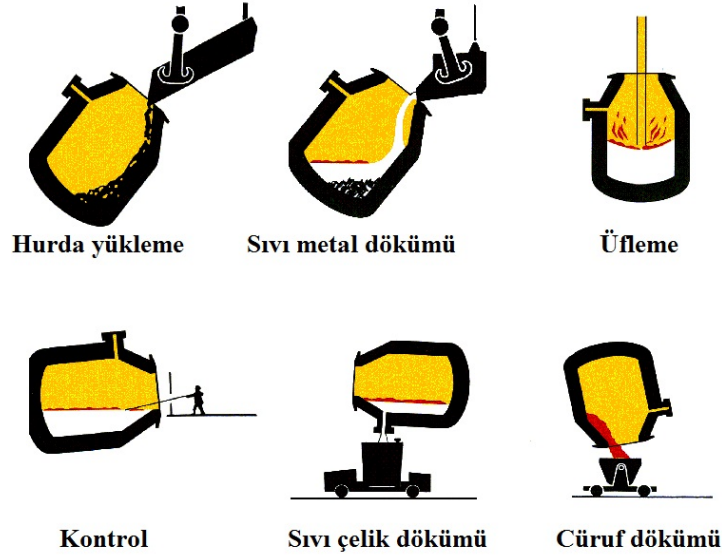


Şekil 4.9: Yüksek fırın cürufunun soğutulması [62].

Modern çelikhanelerde konvertörler metal sıcaklığını ve kimyasal analizini kullanarak şarj edilecek sıcak metal, hurda, cüruf yapıcı, oksijen debisi, lans yüksekliği ve üfleme zamanını hesaplayan bilgisayar sistemleri ile donatılmışlardır. Sıvı ham demir içerisindeki istenmeyen elementlerin cüruf olarak uzaklaştırılması ve üretilmiş çelikten numune alarak kalitesinin onaylanması ile üretim işlemi tamamlanmaktadır. Sıvı çeliğin cüruftan ayrılarak ikincil metalürji istasyonlarına aktarılabilmesi için konvertör döküm koridoruna doğru eğilmektedir. Sıvı çelik döküm deliği vasıtasıyla önceden ısıtılmış potaya boşaltılmaktadır. BOF içerisindeki sıvı çelik ayrımı yapılmasının ardından kalan cürufun dökülmesi için pota ters çevrilerek cüruf temizlik kovanının içine boşaltılmaktadır. BOF işlem adımlarına ait şema Şekil 4.10’da verilmiştir [42].

Bazı oksijen fırını cürufu içerisindeki aktif serbest kireç ve magnezyum oksit, cürufun genişleme potansiyelini arttırmaktadır. Bu sebeple BOF cürufunun kullanılmadan önce belirli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Uygulanan yaygın yöntemde, BOF’ndan alınan 1200°C’deki eriyik cürufun doğrudan düz zemini olan soğutma çukuruna dökülerek ıslak ortamda 6 ile 8 saat arasında bekletilmektedir.

Daha sonra cüruf üzerine su spreyleneğinde ve 4 ile 6 saat soğuması beklendikten sonra su spreyleneğinde tekrarlanmaktadır. Stabile edilmiş BOF cürufu kırılarak farklı uygulamalarda kullanılmaya hazır hale gelmektedir [63].



Şekil 4.10: BOF işlem adımları [64].

4.2.3 Elektrik ark ocağı cürufu

Elektrik ark ocağında çelik üretimi çoğunlukla hürdanın eritilmesi ile yapılmaktadır. EAO'nda üretim geleneksel karmaşık bir yapıya sahip olan çeliğin bünyesinden fosfor, kükürt, alüminyum, silis, mangan ve karbonu uzaklaştırarak yapılmaktadır. Paslanmaz çelik ve takım çelikleri gibi yüksek alaşımlı çelik çeşitleri genellikle hürdaya dayalı olarak üretilmektedir. Krom ve nikel gibi alaşım elementleri kadar kullanılan hürdanın türü de malzeme özelliklerine etki etmektedir. Fırına yüklenen hürda demir-çelik, alaşım elementleri ve kireçtaşının ark elektrotları ile oluşturulan ark sayesinde ısıtılması ile erimiş metal elde edilmektedir. Eriyik haldeki sıvı metale oksijen üflenerek banyodaki karbon seviyesi istenen düzeye çekilmektedir. Banyo içerisindeki birçok bileşik oksijen üflenmesi işlemi sırasında birleşmeyi karbon yerine oksijen ile yapmaktadır. Bu nedenle oksit şeklindeki elementler çelikten cürufa geçmektedir.

1970'lerde Japonya'da başlayan ve ardından 1980'lerin başında Avrupa'da ve ABD'de yaygınlaşan karbon enjeksiyonu ve kabarık cüruf prosesi uygulamaları EAO

teknolojisinde uzun arkın tüm ergitme ve ısıtma sürecinde verimli bir şekilde kullanımına izin vermiştir. Ark yansımalarının olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması, Super Ultra High Power uygulamalarının önünü açmıştır. Kabarık curuf EAO'larda çok yüksek karbonlu çalışma pratiği veya ağırlıklı pik demir ve yüksek fırın çıkışlı sıcak metal kullanılmadığı durumlarda genelde ocak refrakter astarını korumak, termal verimlilik sağlamak ve FeO redüksiyonu sağlamak amacı ile uygulanmaktadır. EAO'larda karbon enjeksiyonu olarak adlandırılan bir uygulama ile karbon önce artırılmakta veya karbon ile oksijen birlikte banyoya değişik lanslar ile enjekte edilmekte ve curuftaki veya çelikteki bu karbon CO haline dönüştürülmektedir. Bu sayede curuf-gaz çözeltisi oluşturularak cüruf kabartılmaktadır. Oluşan CO kabarcıkları arkın gömülmesine yardımcı olmaktadır. Bu olay büyük termal verimlilik sağlamaktadır ve fırın işletmeciliğinde yüksek ark voltajına izin vermektedir. Karbon enjeksiyonunda karbon taşıyıcı element olarak genelde metalurjik veya petro kok tozu, grafit ve antrasit kullanılmaktadır. Lans ile enjekte edilen kok tozu, taşıyıcı gaz ile katı ve gazdan oluşan iki fazlı karışım halinde ergimiş curuf içinde, bir sıvı-gaz ara yüzeyinde reaksiyona başlamaktadır. Bu karışımın bir kısmı curuf içindeki FeO ile reaksiyona girmektedir. Curuf içindeki FeO, enjekte edilmiş katı kok tozu tarafından redüklenme ile birlikte çözeltideki karbon tarafından da redüklenmektedir [65].

İstenilen çeliğin kompozisyonuna ve sıcaklığına ulaşıldığında döküm deliği açılarak ve fırın döndürülerek oluşan çelik potalara transfer edilmektedir. Şekil 4.11'de sıvı çeliğin çelik potasına dökümüne ait görsel verilmiştir. Cüruf ise taşıma potalarına boşaltılarak döküm sahalarına taşınmaktadır. EAO cürufu demir oksitce zengin bir malzemedir ve bünyesinde kireç bulundurmaktadır. Serbest kireç miktarı ise %1'in altındadır. Döküm sahasına taşınan cüruf su spreylenerek soğutulmaktadır. Soğutulmuş cüruf içerisindeki demirin tekrar kullanılması için cüruf kırılmakta ve manyetik alan içerisinde geçen taşıma bantları ile ayırma tabi tutularak elenmektedir. Mıknatıslarda toplanan cüruf EAO'na gönderilerek hurda metal ile birlikte tekrar eritilmektedir. Mıknatıs tarafından çekilmeyen cüruf ise atık sahalarında depolanmaktadır. EAO ile çelik üretiminde istenilen çeliğin metalurjik özelliklerine göre 1 ton çelik üretiminde 60 ile 270 kg arası cüruf oluşmaktadır [66].



Şekil 4.11: EAO'ndan sıvı çeliğin alınması [67].

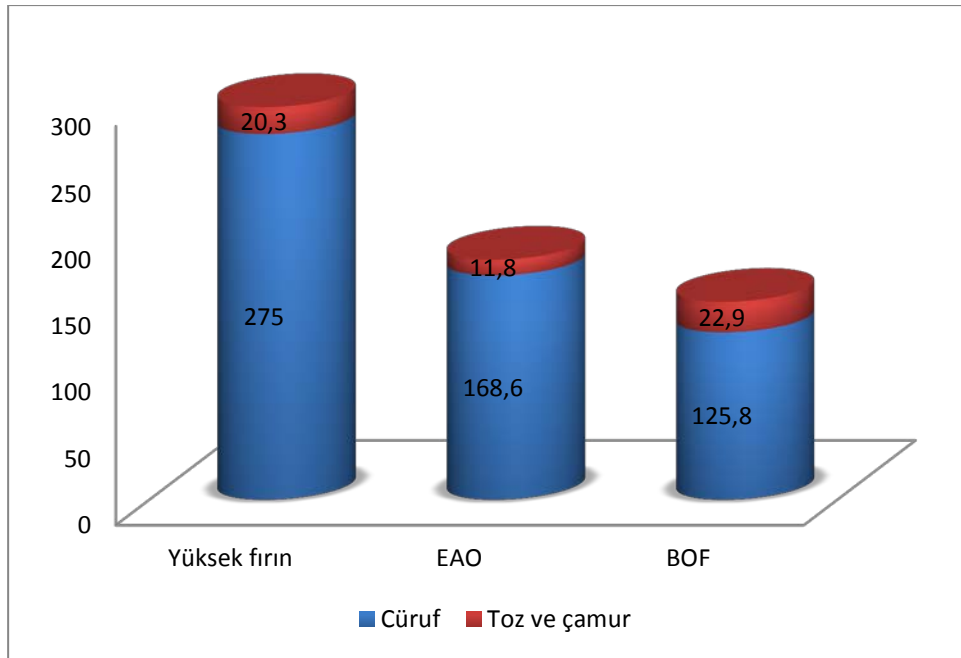
5. DEMİR ÇELİK CÜRUFLARININ ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Ham demir üretimi doğadaki demir cevherinin saflaştırılması ile, çelik üretimi ise elde edilmiş ham demir içerisindeki belli elementlerin demir içerisinden uzaklaştırılması ile elde edilmektedir. Demir, doğada başka elementler ile bileşik yapmış halde bulunmaktadır. Ham demir üretimi yüksek fırınlarda yüksek sıcaklıkta eritilmesi ve istenmeyen elementlerin kireçtaşı ve kok kömürü ile reaksiyonu sonucu saflaştırılması ile elde edilmektedir. Çelik üretimi ise ham demir içerisindeki başta karbon olmak üzere bazı elementlerin uzaklaştırılması ile elde edilebildiği gibi, hurda metalin eritilerek işleminden geçirilmesi ile de elde edilebilmektedir. Cüruf yapıcı maddeler ile reaksiyona giren elementlerin yeni oluşturdukları bileşikler ise sıvı metal banyosu içerisinde yüzeyde toplanmaktadır. Yeni oluşan ve yüzeyde toplanan bu maddelere genel olarak cüruf denilmektedir. Cüruf demir çelik sanayisinin atık ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. 2014 yılında ortaya çıkan tahmini yüksek fırın cürufu 310 ile 370 milyon ton arasında, çelik cürufu ise 170 ile 150 milyon ton arasındadır. Sürekli olarak artan atık cüruflar depolama alanlarını doldurmakta, yeni depolama alanları ihtiyacını arttırmakta ve çevre kirliliği yaratmaktadır. Her yıl artan demir çelik üretimi, devletleri ve kurumları demir çelik üretiminde verimi arttırmak, cüruf oluşumunu azaltmak ve atık cürufların değerlendirilmesi ile ilgili bir çok araştırma yapılmasına sevk etmektedir. Atık olarak değerlendirilmiş bu maddelerin tekrar kullanımının ülke ekonomisine ve doğal kaynakların korunmasına etkisi oldukça önemlidir. Cürufların yapısı değişiklik göstermekle beraber bu malzemelerin inşaat sektöründe değerlendirilebilmesi için imkan sağlamaktadır [68].

Cürufların soğutulma şekilleri farklılık göstermektedir. Bu sebeple sahip oldukları özellikler de farklılık göstermektedir. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olmaktadır. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik göstermekte ve çoğunlukla agrega olarak kullanılmaktadır. Yüksek fırından çıktığında eriyik halinde olan cüruf hızlı olarak soğutulduğu takdirde ise akışkanlığındaki ani azalma

kristalleşmeyi engellemekte ve camsı yapıda bir katı madde elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yarı-kararlı camsı malzeme, bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Bu tür cüruflar daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılmaktadır [69].

Demir-çelik üretiminde ortaya çıkan atık ve yan ürünler yüzde 90 oranında cüruf, toz ve çamurdan oluşmaktadır. 1 ton sıvı metal üretimi için ortaya çıkan yaklaşık yüksek fırında 275 kg cüruf ve 20 kg toz ve çamur, EAO'nda 168 kg cüruf ve 12 kg toz ve cüruf, BOF'nda ise 126 kg cüruf ve 23 kg toz ve çamurdur. Üretim yöntemlerine göre ortaya çıkan yaklaşık yan madde kütleleri Şekil 5.1 verilmiştir [57], [70].



Şekil 5.1: Üretim yöntemlerine göre ortaya çıkan yaklaşık yan madde kütleleri [70].

5.1 Demir Çelik Cüruflarının Fiziksel Özellikleri

Kendi halinde soğumaya bırakılan cürufun granülometrisi çok düzensizdir. Ancak eleme ve kırma işlemine tabii tutulduğunda istenilen granülometriye getirilebilmektedir. Havada soğutulan yüksek fırın cürufu kırılıp elendiği zaman fiziksel özellikleri genel olarak diğer agregalara nazaran özel avantajlar göstermektedir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, iyi bir sürtünme özelliğine ve pürüzlü bir yüzeye ve dolayısı ile iyi bir adhezyona sahip olması üstün özellikleridir. Sıvı haldeki cürufa belirli miktarda su, buhar ve hava püskürtülerek gözenekli bir

yapı sahip olan genişletilmiş yüksek fırın cürufu elde edilebilmektedir. Bu cürufun, özgül ağırlığı 1,1-2,2 gr/cm³'tür. Bu değer, normal agregalara nazaran oldukça düşüktür. Yüksek fırın cürufunun rengi oldukça açık iken, çelikhane cürufunun içindeki yüksek miktardaki demir ve magnezyum sebebi ile renk koyu gridir. Cürufların türlerine göre, yoğunlukları ve fiziksel özellikleri değişiklikler gösterebilmektedir. Cürufun, donma çözülmeye karşı gösterdiği mukavemet oldukça büyüktür. Ayrıca çelik cürufunun sahip olduğu yüksek soyulma direnci ve yüksek yoğunluğu düşük su emme yüzdesi gibi avantajları, bu cürufun bitümlü karışımlarda kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır. Cürufun ısı izalasyonu yapabilme özelliğinin yanısıra işlenme kolaylığı özelliği, ateşe ve donma çözülmeye karşı yüksek dayanıklılık özellikleri de bulunmaktadır. Yüksek fırın ve çelikhane cüruflarına ait fiziksel özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir [71].

Çizelge 5.1: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait fiziksel özellikler [72].

	Yüksek fırın cürufu			Çelikhane cürufu	
	Hava soğutmalı	Granüle	Genleşmiş	BOF	EAO
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,0-2,5	-	1,1-2,2	3,2-3,6	
Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	1120-1360	840	800-1040	1600-1920	
Su emme yüzdesi (%)	1-6	-	-	0-3	

Çelikhane cürufu, yüksek fırında oluşan cürufa göre daha yoğun bir malzemedir. Bu nedenle çelikhane cürufu, yüksek fırın cürufuna göre aşınmaya daha dayanıklı, daha sert ve donmaya karşı daha dayanıklıdır. Yüksek fırın ve çelikhane cüruflarına ait mekanik özelliklerin ortalama değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir [73].

Çizelge 5.2: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait mekanik özellikler [73].

	Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu	Çelikhane cürufu
Los Angeles aşınma değeri (%)	35-45	20-25
Donma kaybı (%)	12	12'den küçük
Sürtünme açısı (°)	40-45	40-50
Sertlik	5-6	6-7
CBR	250'ye kadar	300'e kadar

Çelikhane cürufun fiziksel ve mekanik özellikleri, doğal agraga ile benzerlik göstermektedir. Bu tip cürufların özellikleri çok sert ve dayanıklı olmaları, şekillerinin kenetlenme için uygun olması ve kayma deformasyonuna karşı direnç sağlaması, aşınmaya karşı yüksek direnç göstererek servis ömrünü uzatması, sürtünme değerlerinin yüksek olması sebebiyle kayma dirençlerinin yüksek olması, bazık olmaları sebebiyle bitüm ile kuvvetli birleşmeleri, doğal agregaya göre özkütlelerinin fazla olması esnek üsyaı yapımında cürufun agregaya olarak kullanılmasına imkan sağlayabilmektedir. Dünyanın farklı bölgelerinde kullanılan farklı cevherlerden ortaya çıkan cürufların özellikleri değişiklik gösterebilmektedir. Avustralya, Yeni Zelanda, Yeni Gine ülkelerinin oluşturdukları Avustralasya bölgesinde demir çelik üretimi sonucu ortaya çıkan yüksek fırın ve çelikhane cüruflarına ait özellikler Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3: Yüksek fırın ve çelikhane cürufuna ait özellikler [74].

	Yüksek fırın cürufu	Çelikhane cürufu	
		BOF	EAO
Kuru birim ağırlık (kg/m ³)	2450-2550	3300-3400	3300
Doygun kuru yüzey birim ağırlık (kg/m ³)	2550-2650	3350-3450	3400
Kuru dayanım (kN)	85-100	275	250
Yaş dayanım (kN)	65-90	230-300	240-300
Islak-kuru dayanım değişimi (%)	10-20	5-20	5-15
Su emme (%)	4-7	1-2 (kaba agregaya) 2-4 (ince agregaya)	1-2 (kaba agregaya) 2-4 (ince agregaya)
Los Angeles aşınma değeri (%)	37-43	12-18	16
Cilalanma değeri	-	58-63	58-63
Donma kaybı (%)	-	4'ten az	4'ten az
Maksimum kuru birim ağırlık (20 mm standart kompaksiyon) (kg/m ³)	2050-2150	2300-2400	2300-2400
Optimum su muhtevası	8-12	8-12	8-12

5.2 Demir Çelik Cüruflarının Kimyasal Özellikleri

Cürufların kimyasal özellikleri kullanılan hammaddeye ve cüruf yapıcılara göre değişiklik göstermektedir. Yüksek fırın cürufunun yapısı cevher içerisindeki elementler ve cüruf yapıcı olarak kullanılan kireç tarafından oluşturulmaktadır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısında kireç, silika, alümin, kükürt, magnezi,

manga oksit ve demir bulunabilmektedir. Kullanılan cevherin cürufun yapısını etkilemesi nedeniyle Dünya'nın farklı bölgelerinde yapılan demir üretiminde, oluşan cüruflar farklılık göstermektedir. Çizelge 5.4'de farklı bölgelerde oluşan yüksek fırın cüruflarına ait yaklaşık kimyasal içerik verilmiştir [56].

Çizelge 5.4: Yüksek fırın cüruflarının kimyasal içerikleri [56].

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
Kireç (CaO)	29-50	30-40	38-44	34-41
Silika (SiO ₂)	30-40	30-36	33-37	34-36
Alümina (Al ₂ O ₃)	7-18	9-16	15-18	13-19
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	0,1-1,5	-	0-0,7	0,3-2,5
Magnezyum oksit (MgO)	0-19	8-21	1-3	3,5-7
Mangan oksit (MnO)	0,2-1,5	-	0,3-1,5	1-2,5
Kükürt (S)	0-2,0	1-1,6	0,6-0,8	1-2
Sülfür trioksit (SO ₃)	-	-	-	-

BOF ve EAO cüruflarının kimyasal ve mineralojik yapısı benzerlik göstermektedir. Her iki yöntemle de ortaya çıkan cürufların ana kimyasal bileşenleri kireç ve demir oksittir. BOF ile üretim sırasında eriyik demirin çeliğe dönüştürülmesi esnasında oksitlenen demir elementinin, demir oksit olarak cüruf yapısına katılması engellenememektedir. Cüruf yapısına katılan demir oksit oranı BOF'nın verimliliği ile ilişkilidir. Üretim yüksek miktarda kireç ve dolomit kullanımını gerektirmektedir, bu sebeple cüruf içerisinde yüksek miktarda kireç bulunmaktadır. BOF fırını cürufunun kimyasal içeriği kireç, demir oksit ve silikadır. EAO cürufunun kimyasal yapısı BOF cüruna benzemektedir ancak EAO cürufunun yapısını belirleyen en önemli etken geri dönüşümü yapılan hurdanın içeriğidir ve daha fazla çeşit madde barındırabilmektedir. Çizelge 5.5'te BOF ile yapılan çelik üretiminde ortaya çıkan cürufun ve EAO ile çelik üretiminde ortaya çıkan oksitlenmiş cüruf ile paslanmaz çelik üretiminde oluşan redükleyici cürufun yaklaşık kimyasal içerikleri verilmiştir [75], [76].

Çizelge 5.5: Çelikhane cüruflarının kimyasal içerikleri [75].

	BOF	EAO	
		Oksitlenmiş	Redükleyici
Demir oksit (FeO)	10-25	12-25	<0,5-0,6
Mangan oksit (MnO)	5,0-15	5,0-10	<0,4
Fosfor pentaoksit (P ₂ O ₅)	0,5-3,0	0,5-2,0	-
Silika (SiO ₂)	12-17	10-20	15-20
Kireç (CaO)	35-45	40-50	50-55
Alümina Al ₂ O ₃	-	1-3	2-3
Magnezyum oksit (MgO)	3-15	5-10	<10
Kalsiyum Florid (CaF)	-	-	5-8

Demir çelik üretiminde oluşan cürufların içerisinde serbest kireç bulunması, bu malzemelerin su ile teması şişmelerine neden olmaktadır. Serbest kireç su ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit oluşturmaktadır. Serbest kireç içeren cüruflardaki şişmeler %10-20 arasında olabilmektedir. Bu nedenle cürufların agrega olarak kullanılmadan önce stabilize edilmeleri gerekmektedir. Stabilizasyon, cürufların açık havada 1-3 ay arasında bekletilmesi ve cürufların son hacimlerine kavuşmasının sağlanması ile yapılmaktadır [77].

5.3 Demir Çelik Cüruflarının Kullanım Alanları

Demir kullanımı tarihin en eski çağlarında başlamaktadır. Bilinen kaynaklara göre, demir cürufunun yol inşaatında kullanılmaya başlaması günümüzden 2000 yıl öncesinde Roma İmparatorluğu'nda başlamaktadır. O dönemde temel tabakasında kullanıldığı bilinen demir cürufu, tarih boyunca farklı amaçlarda kullanılmıştır. Cürufun tarih boyunca kullanımları 1589 yılında Almanya'da top güllesi olarak, 1652'de İngiltere'de rıhtım yapımında, 1852'de Almanya'da çimento içerisinde bağlayıcı olarak, 1840'da Galler'de cüruf yünü olarak, 1892'de Almanya'da

güçlendirilmiş beton yapısında ve 1901’de Japonya’da tuğla yapımında olarak örneklendirilebilir [78].

Yüksek fırın ve çelikhane cüruflarının sanayi kollarında yan ürün olarak kullanımı ABD’de yaklaşık 100 yıl önce, Avrupa’da ise yaklaşık 150 yıl önce başlamıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısında granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliğinin anlaşılması ile uzun yıllar kompozit çimento bileşeni olarak kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufunun ABD’de kullanılmaya başlaması, pahalı bir atığın geri kazanımının sağlanması amacı ile başlamıştır. 1900’lerdeki bu arayış, cürufun inşaat alanında özellikle demiryolu balastı olarak, portland çimentosu betonunda agrega olarak ve bitümlü ve diğer tip yol inşaatlarında agrega olarak kullanılabilirliğinin denemesini başlatmıştır. Ulusal Cüruf Birliği ABD’de ilk defa 1938 yılında cüruf kullanımını takip etmeye başlamış ve 1939’da yayınladığı raporda, 1 yıl içerisinde 8,3 milyon ton yüksek fırın cürufunun otoyol inşaatında ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanıldığını belirtmiştir [79], [80].

Çizelge 5.6’da kuruluş yıllarına göre ulusal ve bölgesel cüruf birliklerine ait detaylar verilmiştir [81].

Çizelge 5.6: Ulusal ve bölgesel cüruf birlikleri [81].

Ülke/Bölge	Kurum adı	Kuruluş yılı
ABD	National Slag Association	1918
Almanya	Association of German Portland and Slag Cement Works	1948
Almanya	Technical Association for Ferrous Slag	1968
Japonya	Nippon Slag Association	1978
İngiltere	Cementitious Slag Makers Association	1958
Avustalya	Australasian (iron & steel) Slag Association	1990
Kanada	Canadian Slag Association	-
Avrupa	European Slag Association	2000
ABD	Slag Cement Association	2012

Yüksek fırın cürufu ile çelikhane cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri yapım ve inşaat işlerinde kullanımları için uygun gereksinimleri sağlamaktadır. Cürufların kullanılabilirlikleri fırınlardan alındıktan sonra uygulanan soğutma yöntemlerine göre değişkenlik göstermektedir.

Büyük miktarda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan granüle yüksek fırın cürufları, öğütülerek çok ince taneli duruma getirilmeleri durumunda, puzolanik

özellik göstermektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım tarzları mevcuttur. Beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir. Cürufun optimum inceliğe getirilmesi, değişik koşullarda kullanılacak beton karışımlarının hazırlanmasındaki esneklik gibi faktörler, cürufun ayrı öğütülerek beton katkısı olarak kullanımını daha avantajlı kılmaktadır. Türkiye’de cürufun ayrıca öğütülerek beton katkı malzemesi olarak kullanılması son yıllarda artmıştır. Çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılan puzolanın, reaksiyona gireceği kalsiyum hidroksit, ortama çimentonun hidratasyonu sonucu çıkmaktadır. Beton katkı maddesi olarak puzolanların olumlu etkileri arasında çimentodan tasarruf, işlenebilme, düşük hidratasyon ısısı, geçirimsizlik ve dış etkenlere karşı dayanıklılık gibi özellikler sayılabilir [82].

Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun portland çimentosu veya bitüm bağlayıcılı uygulamalarda ve bağlayıcısız uygulamalarda agrega olarak kullanılması, su ile soğutulmuş cürufun tuğla yapımında ve hafif çimento içersinde agrega olarak kullanılması, granüle cürufun bağlayıcı olarak kullanılması mümkün olmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu kullanılan bağlayıcının, portland çimentosuna göre avantajları hidratasyon esnasında daha az ısı oluşturmaması ve daha yüksek sülfat dayanımı sağlamasıdır.

Çelikhane cürufunun genel olarak köşeli şekilde ve sert yapıda oluşması, cürufun ulaştırma alanında kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Çelikhane cürufu bitümlü sıcak karışımlarda aşınma tabakasında, superpave ve taşmastik asfalt uygulamalarında kullanılmaktadır.

Yüksek fırın ve çelikhane cüruflarının kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

-Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu:

- Kırılmamış: Dolgu yapımında, zorlu çalışma alanlarında sahadaki boşlukların doldurularak kaplama yapımı için uygun zemini hazırlamakta
- Kırılmış ve gradasyonlu: Beton agregası olarak, beton karışımında filler malzeme olarak, izolasyon amaçlı cam yünü olarak, beton levhalar altında platform olarak, orta derece filtre imalatında

- Granüle yol temeli: Doğrudan veya diğer cüruf, doğal agrega ile karıştırılarak

-Granüle yüksek fırın cürufu:

- Bağlayıcı: Granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak kullanılması, normal beton karışımı içerisinde kullanılan portland çimentosunun %30-50'si kadar cüruf kullanılmasıdır. Su içerisinde yapılacak uygulamalar gibi özel durumlarda kullanılan cüruf oranı %70'e kadar çıkabilmektedir. Granüle yüksek fırın cürufu ayrı olarak öğütülebildiği gibi portland çimentosu ile birlikte de öğütülebilmektedir. Uygulamada genel olarak betonun daha erken priz alabilmesi için yüksek fırın cürufu, portland çimentosundan daha ince öğütülmektedir.

- Agrega: Öğütülmemiş granüle yüksek fırın cürufunun beton agregası olarak

- Yol yapımında: İnce yapısı çalışma kolaylığı sağlamaktadır.

- Alt temel: Havada soğutulmuş cürufa göre daha kolay sıkışmaktadır. Sıkıştırılması yapılan tabaka önce yumuşak halde olup zamanla sertleşmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliğini, cürufun %99.5 oranına kadar çıkabilen aktif camsı yapısı etkilemektedir.

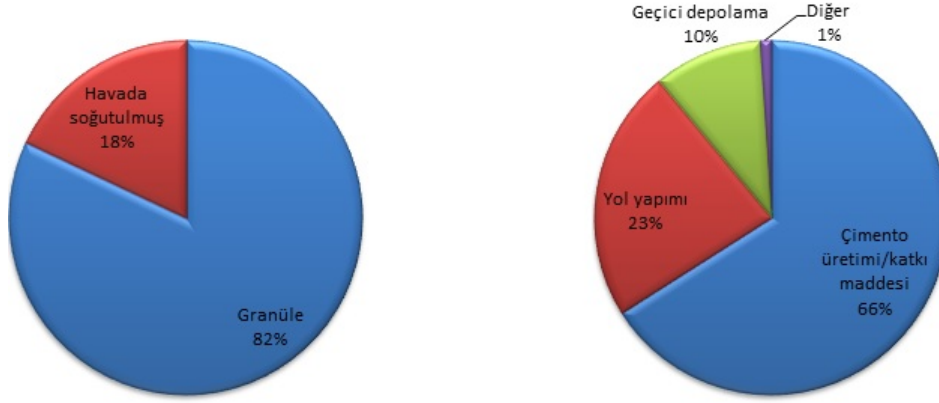
Diğer alanlarda, cam yapımında, blok beton üretiminde, drenaj yapımında, dolgu yapımında, maden dolgusunda, zımpara kumu olarak kullanılmaktadır.

Çelikhane cürufu:

- Granüle cüruf, uçucu kül ve kireç gibi birçok malzeme ile karıştırılarak kaplama materyali olarak kullanılmaktadır. Çelikhane cürufu yüksek fırın cürufuna göre daha sert, aşınmaya ve darbeye karşı daha dayanıklı ve kesme kuvvetine karşı daha yüksek mukavemet göstermektedir. Bu sebeple ağır taşıt yüklerinin olduğu asfalt uygulamalarında yüksek fırın cürufu yerine çelikhane cürufu tercih edilmektedir.

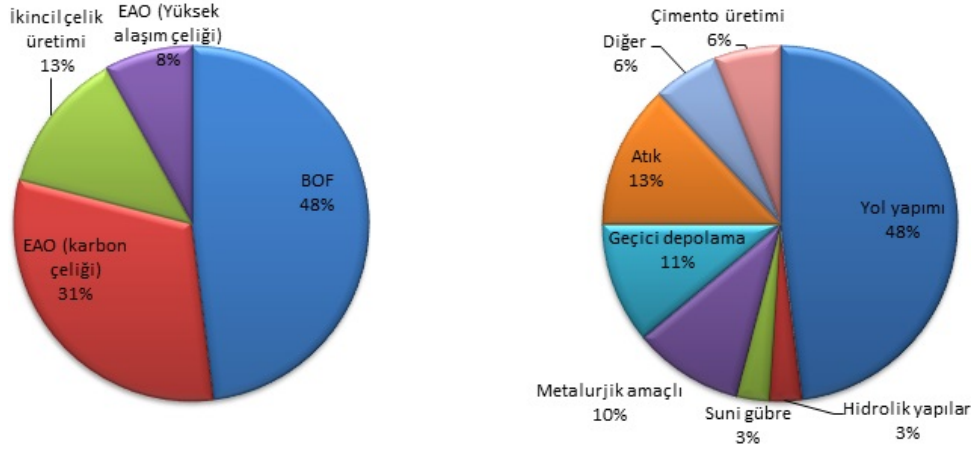
- Diğer alanlarda, yüksek kayma dirençli asfalt agregası olarak, demiryolu balast malzemesi olarak, bitümlü sıcak karışım agregası olarak, zemin stabiliteörü olarak, gevşek zeminlerde dolgu olarak kullanılmaktadır [79], [83].

2010 yılında Avrupa ülkelerindeki yüksek fırınlarda ortaya çıkan cürufun soğutulma yöntemine göre ve oluşan cürufun kullanım alanlarına göre dağılımlar Şekil 5.2’de gösterilmiştir [84].



Şekil 5.2: Avrupa ülkelerindeki yüksek fırın cürufu kullanımı [84].

Avrupa Birliği ülkelerindeki 2010 yılına ait çelikhane cürufları miktarı ve kullanım alanları Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3: Avrupa ülkelerindeki çelikhane cürufu kullanımı [84].

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Kullanılan Malzemeler

Esnek tip üstyapıların binder tabakasında EAO cürufunun agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, EAO cürufu, İstanbul Ömerli bölgesinden temin edilen doğal agrega ve bitüm kullanılmıştır.

6.1.1 EAO cürufu

Çalışmada, elektrik ark fırını cürufu kullanılmıştır. Kaba boyutlarda temin edilen cüruf Çizelge 6.1’de belirtilen Amerikan Elek Sistemi aralıklarını sağlayacak şekilde konkasörde kırılmıştır.

Çizelge 6.1: Amerikan Elek Sistemi [33].

Amerikan Elekleri (ASTM)	
Elek No	Boyut (mm)
(1 ½")	37,5
(1")	25,0
(¾")	19,0
(½")	12,5
(⅜")	9,5
No.4	4,74
No.8	2,38
No.10	2,00
No.16	1,19
No.20	0,84
No.30	0,59
No.40	0,425
No.50	0,297
No.80	0,180
No.100	0,149
No.200	0,075

6.1.2 Doğal agrega

Çalışmada, cüruf kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen sonuçların, doğal agrega kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için ihtiyaç duyulan doğal agrega İstanbul Ömerli bölgesinden temin edilmiştir. Amerikan Elek Sistemi'nin belirttiği sınırlar dışında kalan kaba agrega konkasörde kırılmıştır. Şekil 6.1'de konkasöre ait görüntü verilmiştir.



Şekil 6.1: Konkasör.

6.1.3 Bitüm

TS EN 12591 standardında belirtilen bitümlü bağlayıcılar içerisinde en çok tercih edilen bitüm sınıfları B 50/70, B 70/100 ve B 100/150'dir. Bitümlü bağlayıcılar arasında düşük kıvamlı bitümler soğuk iklimli bölgelerde, yüksek kıvamlı bitümlerin ise sıcak iklimli bölgelerde kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.'den temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır [85].

6.2 Malzemelere Uygulanan Deneyler

Çalışmada, Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'ün Kısım 407 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakaları başlığında belirtilen kriterler ve standartlar göz önüne alınmıştır.

Binder tabakasının oluşturulmasında kullanılan bitüm ve agrega malzemelerine ait fiziksel ve mekanik veriler için İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ulaştırma Mühendisliği Yol Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen çalışmalar sırasında elde edilen değerler kullanılmıştır.

Bitümlü sıcak karışım tasarım yöntemi olarak şartnamede belirtilen Asphalt Institute MS-2 el kitabına göre Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. İlgili deneylerde kullanılacak numunelerin hazırlanmasında ve saklanmasında, deneylerin yapılmasında gerekli olan elek serisi, konkasör, hassas terazi, su banyosu, etüv, kızılötesi termometre, karıştırıcı, Marshall deney kalıpları, Marshall sıkıştırma tokmağı, Marshall deney aleti için İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Yol Laboratuvarı kullanılmıştır.

6.2.1 Agregalara uygulanan deneyler

Yapılan çalışmada kullanılacak olan agreganın ve EAO cürufun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla numuneler üzerinde Karayolları Teknik Şartnamesi'nde belirtilen kaba agregalarda elek analizi, parçalanma direnci, hava tesirine karşı dayanıklılık, kırılmışlık, yassılık indeksi, cilalanma değeri, su emme ve özgül ağırlık, soyulma mukavemeti deneyleri, ince agregalarda plastisite indeksi, organik madde, su emme ve metilen mavisi deneyleri yapılmıştır.

6.2.1.1 Elek analizi

Bir agrega yığını içerisindeki tanelerin büyüklüklerine göre gösterdikleri tane dağılımı oranına gradasyon denilmektedir. Gradasyon eğrisi, yığın içerisindeki agrega tanelerin boyutlarına göre dağılımını gösteren eğridir. Elek analizi; agrega numunesindeki tanelerin büyüklüklerine göre dağılım oranını belirlemeye yarayan deneysel bir yöntemdir. Elek analizi ASTM C-136 (AASHTO T-11) standardına uygun olarak, Çizelge 6.1'de ölçüleri verilen elekler kullanılarak yapılmıştır[85].

Agregaların boyut sınıflandırmasına göre isimlendirilmesi,

- 4 No'lu (4.75mm) elek üzerinde kalan agregalar için kaba agreg
- 4 No'lu elekten geçen fakat 200 No'lu elek üzerinde kalan agregalar için ince agreg
- 200 No'lu elekten geçenler için mineral filler

olarak yapılmaktadır. Cüruf ve agreg için ayrı ayrı yapılan bu deneyde numuneler, sıcaklığı $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ olan etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar etüv içerisinde bekletilmiştir. Ağırlıkları sabitlenen cüruf ve agreg oda sıcaklığında bekletilerek soğutulduktan sonra kaba ve ince agreganın ayrımı yapılması için 4 No'lu elek kullanılarak elenmiştir. 4 No'lu elek üzerinde kalan ve kaba agreg olarak tanımlanan numuneler sırasıyla $1\frac{1}{2}$ ", 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " No'lu elekler ile elenmiştir. 4 No'lu elekten geçen ince agreg sırasıyla 8 ,10 ,16 ,20 ,30 ,40 ,50, 80, 100, 200 No'lu eleklerde elenmiştir. 200 No'lu elekten geçen numune mineral filler olarak sınıflandırılmıştır. Her eleme işleminde kullanılan elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır ve toplam ağırlık ile Eşitlik 6.1 kullanılarak her elek aralığı için % kalan hesaplanmıştır.

$$\%Kalan = \frac{A}{B} \times 100 \quad (6.1)$$

Burada:

A = Kullanılan elek üzerinde kalan numenin ağırlığı

B = Toplam numune ağırlığı

6.2.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini

Agregalar boşluklu yapıya sahip malzemelerdir. Agregaların özgül ağırlıkları, gerçek birim hacmine karşılık gelen ağırlığı olarak tanımlanır [32].

Su emme oranı, agreganın yapısında bulunan ve sıvı maddeler ile dolabilecek boşlukları ifade etmektedir. Doygun kuru yüzey durumundaki agreg numunesinin, kuru ağırlığına oranı su emme oranını vermektedir. Agreg içerisindeki sıvı ile doldurulabilecek boşluklar, bitümlü sıcak karışım yapımında bitümlü bağlayıcının

agrega tarafından emilmesi sayesinde kuvvetli adezyon oluşturmaktadır. Boşluk oranı fazla agreganın özgül ağırlığı düşük olmaktadır ve yol yapımı için gereken sağlamlıkta olmamaktadır. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri kaba agrega için ASTM C 127, ince agrega için ASTM C128 standardına göre yapılmıştır.

Kaba agregalar için özgül ağırlık ve su emme oranı tayini

ASTM C127 standardına göre yapılan deney, 25 mm ile 4,75 mm açıklıklı elekler arasında kalan malzemeden, 25-19 mm 4 kg, 19-12,5mm 2 kg, 12,5-9,5 mm 1 kg, 9,5-4,75mm 1 kg, kullanılarak yapılmıştır. Malzeme, içerisindeki tüm boşlukların su ile dolarak doymun hale gelmesi için 24 saat su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 6.2). Doymun hale gelen agregalar, su içerisinde çıkarılmış ve emici bir bez kullanılarak yüzeylerindeki su filmi kurutulmuştur. Bu işlem sonucu agregalar suya doymun, yüzeylerinin kuru olduğu hale gelmiştir. Agregaların doymun kuru yüzey ağırlığı 0,1 gr hassasiyetindeki tartıda tartılmıştır (B). Doymun kuru yüzey durumundaki agregalar, suyun uyguladığı kaldırma kuvvetinden faydalanılarak hacimlerinin bulunabilmesi için 23 ± 2.0 °C'deki su içerisinde tartılmıştır (C). Agregalar içerlerindeki tüm suyun uzaklaştırılması için sıcaklığı $110 \pm 5^\circ\text{C}$ olan etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kurutulmuştur ve daha sonra oda sıcaklığında 3 saat kadar soğumaya bırakılmıştır. 3 saat sonunda tartılan agregalar, kuru ağırlık değeri A olarak kayıt edilmiştir. Eşitlik 6.2, Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4 kullanılarak hacim özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri hesaplanmıştır [86].

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = \frac{\text{kN}}{\text{cm}^3} = \frac{A}{B - C} \quad (6.2)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{\text{kN}}{\text{cm}^3} = \frac{A}{A - C} \quad (6.3)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (6.4)$$

Burada:

A = Kuru ağırlık (g)

B = Doymun kuru yüzey ağırlık (g)

C = Sudaki ağırlık (g)



Şekil 6.2: Agregaların su içerisinde bekletilerek doymun hale getirilmesi.

İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme oranı tayini

ASTM C128 standardına göre yapılan ince agreganın özgül ağırlığı ve su emme oranı tayini, ASTM D75 standardında belirtilen karışım granülometrisinden hazırlanan 1000 gr numune ile yapılmıştır. Hazırlanan numune bir tepsi içine yayılmış ve su ile doldurulmuştur. 24 saat su içerisinde bekletilerek doymun hale gelmiş malzeme, emici olmayan bir yüzeye serilerek doymun kuru yüzey elde etmek amacıyla sıcak hava üflenerek karıştırılmıştır. Kurutma işlemi malzeme serbest akar hale gelene kadar devam ettirilmiştir.

Deney için hazırlanan 1000 gr numuneden 500 ± 10 gr ayrılmış ve tartılmıştır (S_1). Karışımın yapılacağı piknometre içerisine bir miktar su konulmuş ve doymun kuru yüzey durumdaki tartılmış numune piknometre içerisine dökülmüştür. Piknometreye bir miktar daha su eklenmiş ve karışım içerisinde hava kabarcığı kalmayınca kadar karıştırılmıştır. Hava kabarcıklarından arındırılmış karışım üzerine piknometrenin kalibrasyon çizgisine kadar su doldurulmuş ve 23 ± 2.0 °C sıcaklığa gelinceye kadar ısıtılmıştır. Isıtılmış karışım tartılmıştır (C). Tartılmış karışım bir tepsi üzerine dökülmüş ve karışım tamamen kuruyarak sabit ağırlığa gelinceye kadar sıcaklığı 110 ± 5 °C olan etüve yerleştirilmiştir. Kuruyan numune 1 saat kadar oda sıcaklığına

bekletilerek tartılmıştır (A₁). Piknometre kalibrasyon çizgisine kadar su ile doldurulmuş ve su sıcaklığı 23 ± 2.0 °C yapılarak tartılmıştır (B).

Su emme oranı tayini için, 500 ± 10 gr ayrılmış ve tartılmıştır (S₂). Tartılan numune sabit ağırlığa gelinceye kadar sıcaklığı 110 ± 5°C olan etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numune oda sıcaklığında soğutulduktan sonra tartılmıştır (A₂).

Hacim özgül ağırlık Eşitlik 6.5, görünen özgül ağırlık Eşitlik 6.6, su emme yüzdesi Eşitlik 6.7 ile hesaplanmıştır [87].

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = \frac{kN}{cm^3} = \frac{A}{B + S - C} \quad (6.5)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{kN}{cm^3} = \frac{A}{B + A - C} \quad (6.6)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (6.7)$$

Burada:

A = Kuru ağırlık (g)

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı (g)

C = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu ve numune konmuş piknometre ağırlığı (g)

S = Doygun kuru yüzey ağırlık (g)

Mineral filler için özgül ağırlık tayini

Piknometre kalibrasyon çizgisine kadar su ile doldurularak 23 ± 2.0 °C'ye kadar ısıtılmış ve tartılmıştır (B). Piknometre boşaltılmış ve kurutulmuştur. Filler malzemesi 110 ± 5°C olan etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulduktan sonra 20 gr numune 1 mg hassasiyetli tartıda tartılarak ayrılmış (A), piknometre içerisine konmuştur. Piknometre bir miktar distile su ile doldurulmuş ve vakum makinasına bağlanarak karışım içindeki hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra piknometre kalibrasyon çizgisine kadar saf su ile doldurulmuş ve 23 ± 2.0 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Isıtılmış karışım tartılmıştır (C). Filler malzemenin özgül ağırlığı Eşitlik 6.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{\text{kN}}{\text{cm}^3} = \frac{A}{A + B - C} \quad (6.8)$$

Burada:

A = Kuru ağırlık (g)

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı (g)

C = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu ve numune konmuş piknometre ağırlığı (g)

Piknometre içerisindeki filler malzemesinin vakumu ve vakumlanmış piknometrenin saf su ile doldurularak yapılan tartımı Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3: Filler özgül ağırlık tayini.

6.2.1.3 Los Angeles deneyi

Los Angeles deneyi, test makinasında aşınma ve darbe ile kaba agreganın parçalanmaya karşı direncini tayin etmek üzere uygulanan bir deneydir. Test belirli elek aralığındaki numunenin, belli sayı ve ağırlıktaki çelik bilyeler ile test makinasında döndürülmesi ve parçalanmış agrega oranının belirlenmesi ile bulunmaktadır. Test makinası TS EN 1097 standartlarında belirtildiği üzere, 12 mm kalınlıkta çelikten yapılmış, iç çapı 711 ± 5 mm, iç derinliği 508 ± 5 mm olan içi boş ve merkez ekseninden elektrik motoruna bağlanmış tamburdur. Çelik bilyeler 45 mm ile 49 mm arasındaki çaplarda, 400 gr ile 445 gr ağırlıklardadır. Test makinasına ve çelik bilyelere ait görüntü Şekil 6.4’te verilmiştir. Bu deney ASTM C131 deney standardına göre yapılmıştır. Test edilecek numune elek aralıklarına göre sınıflandırılmış olup, her sınıflandırma için gerekli aşındırma yükleri tablo halinde verilmiştir. Bu deneyde B sınıfı elek aralıkları seçilmiş olup, 19,0 – 12,5 mm elek arası 2500 ± 10 gr, 12,5 – 9,5 mm elek arası 2500 ± 10 gr numuneler alınmıştır. Elde

edilen karışım, malzeme üzerindeki toz ve kirden arındırılmak için yıkanmış ve sıcaklığı $110 \pm 5^\circ\text{C}$ olan etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş agregaya karışımından 5000 ± 10 gr numune alınarak tartılmıştır (A). Tartılan numune test makinasına yerleştirilmiş ve standartta belirtilen aşındırma yükü, 11 bilye 4580 ± 25 gr, test makinasına eklenmiştir. Dışarıya numune kaçırmayacak şekilde mühürlenene test makinası dakikada 30 – 33 devir hızla, 500 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. Döndürölme işlemi tamamlanmış numune makinadan alınarak 12,5 mm elekten elenmiş ve elek üzerinde kalan numune yıkanmıştır. Yıkınan numune $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır (B). Los Angeles parçalanma direnci Eşitlik 6.9'daki bağıntı ile yüzde cinsinden hesaplanmıştır [88].



Şekil 6.4: Los Angeles test makinası.

$$\text{Los Angeles parçalanma direnci} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6.9)$$

Burada:

A = İlk kuru ağırlık (g)

B = Son kuru ağırlık (g)

6.2.1.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık testi, agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında, laboratuvarında kısa süre içinde bir karar verebilmek amacı ile uygulanan hızlandırılmış bir deneydir. Deney, tekrarlı olarak

agreganın magnezyum sülfat veya sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmesi, çözeltiden çıkarılarak kurutulması ve tekrar çözelti içinde bekletilmesi şeklinde yapılmaktadır. Agreganın boşluklu yapıda olması ve sıvı emilimi yapması nedeniyle, agreganın çözelti içerisinde bekletilmesi bu boşlukların çözelti ile dolmasına sebep olmaktadır. Çözeltiden çıkarılarak kurutulan agregadaki boşluklarda kullanılan çözeltiye göre magnezyum sülfat veya sodyum sülfat tuzu kalmaktadır. Oluşan tuzun tekrar çözelti ile teması, tuzun şişmesine neden olmaktadır. Bu şişme, üstyapı tabakalarındaki agregalara giren suyun donması ile oluşan parçalanmayı temsil etmektedir [16].

Deney ASTM C88 standardına göre, 19 – 12,5 mm elekler arası 670 ± 10 gr, 12,5 – 9,5 mm elekler arası 330 ± 5 gr numune kullanılarak yapılmıştır. Numune yıkanmış ve sıcaklığı $110 \pm 5^\circ\text{C}$ olan etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulan numune tartılmıştır (A) ve hazırlanan magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde konulmuştur. Çözelti içerisindeki agregalar $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 16 ile 18 saat arası bekletilmiştir. Bekleme süresi tamamlanan agregalar, çözelti içerisinde çıkarılmış ve $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüve sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurulmuştur. Kurutulan numune oda sıcaklığında soğutulularak tekrar magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde konulmuştur (Şekil 6.5). Çözelti içerisinde bekletme, kurutma ve çözelti içerisinde yerleştirilme döngüsü 5 kez tekrarlanmıştır. 5. kurutmadan sonra numune suyla yıkanmış ve 8 mm elek üzerinde kalan numune kurutulmak üzere etüve yerleştirilmiştir. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurutulan numune son kuru ağırlığın tespiti için tartılmıştır (B) [89].



Şekil 6.5: Kurutulan agregaya magnezyum sülfat çözeltisi eklenmesi.

Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi ile parçalanmış tane oranı Eşitlik 6.10 kullanılarak hesaplanmıştır [89].

$$\text{Parçalanmış tane oranı} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6.10)$$

Burada:

A = İlk kuru ağırlık (g)

B = Son kuru ağırlık (g)

6.2.1.5 Kırılmışlık oranı

Deney, iri agregalardan oluşan bir deney numunesindeki ezilmiş veya kırılmış tanelerin ve yuvarlak tanelerin el ile sınıflandırılmasıdır. Yüzeyi kırılmış agrega, bitümlü karışım içerisinde içsel sürtünme katsayısını arttırmakta ve karışımın stabilitesini arttırmaktadır. KTŞ 2013’de belirtildiği üzere deney TS EN 933-5 standardına göre yapılmalıdır ve karışma giren kaba agreganın en az % 95’inin tüm yüzeyleri kırılmış olmalı, hiçbir yüzeyi kırılmamış agrega bulunmamalıdır.

6.2.1.6 Yassılık indeksi

Agreganın ait olduğu elek aralığı sınıfında, agreganın kalınlığı elek aralığı açıklığının %60'ından az ise, o agreganın yassılık indeksi olarak sınıflandırılmaktadır. Yassılık indeksi, agreganın yassılık eleklerinden elenerek (Şekil 6.6) elekten geçen numunenin ağırlığının, deneye alınan numunenin ağırlığına oranı ile bulunmektedir. Deney BS 812 standardına göre yapılmıştır. 10 – 6,35 mm elek arası 500 gr, 14 – 10 mm elek arası 1000 gr, 20 – 14 mm elek arası 2000 gr, 28 – 20 mm elek arası 5 kg ve 37,5 – 28 mm elek arasından 15 kg malzeme alınarak numuneler ayrı yıkanmış ve tepsilere konularak $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuşlardır. Kurutulan numuneler standartta belirlenen miktarlarda tartılarak ayrılmıştır. Numuneler elek aralıklarına karşılık gelen yassılık eleklerinden elenmiş ve elekten geçen numuneler tartılmıştır (A). Eleklerin üzerlerinde kalan numuneler ayrı ayrı tartılarak kaydedilmiştir (B). Yassılık eleklerine ait görüntü Şekil 6.6'da verilmiştir. Yassılık indeksi yüzdesi Eşitlik 6.11 kullanılarak hesaplanmıştır [90].

$$\text{Yassılık indeksi} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (6.11)$$

Burada:

A = Elekten geçen malzemenin ağırlığı (g)

B = Elekte kalan malzemenin ağırlığı (g)



Şekil 6.6: Yassılık indeksi elekleri.

6.2.1.7 Cilalanma Değeri

Cilalanma deneyinin amacı, çeşitli yol taşlarının trafik altında sşrtşnme ile aşınarak ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuvarıa kısa bir zamanda saptamaktır. başlıca faktşrlerden biridir. Deneyde hazırlanan agrega numunesine cilalanma test makinasında sşrekli olarak sşrtşnme kuvveti uygulanarak oluşan cilalanma miktarını belirlenmektedir. Cilalanma test makinası, cilalanma numunelerinin yapıştırıldığı yol tekerleği olarak adlandırılan 406 ± 3 mm çapında ve $44,5 \pm 0,5$ mm genişliğindeki silindir, cilalanma numunelerine sşrtşnme kuvveti uygulayan 200 ± 3 mm çaplı, 38 ± 2 mm genişlikli lastik tekerlek ve zımpara tozu su karışımının dřkřldřęř hazneden oluşmaktadır. Yol tekerlerleği, çevresine 14 numune yapıştırılarak dakikada 320 ± 5 devirde dşndşrşlmektedir. Test makinasına ve cilalanma numunesine ait gşrşntş şekil 6.7’de verilmiştir. Belirlenmiş sşre boyunca aşındırılan numuneler sşrtşnme test cihazında test edilmektedir. Sşrtşnme test cihazı, eksenden 410 ± 5 mm uzaklığa yerleştirilmiş 1,50 kg ağırlık bulunan 510 mm uzunluğundaki serbest hareket edebilen sarkaç ve sarkaca bağlı lastik yşzey ile, sşrtşnme değerinin okunduğu sayaca sahiptir. Sşrtşnme test cihazına ait gşrşntş şekil 6.8’de verilmiştir [16].



şekil 6.7: Cilalanma test makinası ve cilalanma numunesi.

Deney TS EN 1097-8 standardına göre yapılmıştır. Cilalanma numunesinin hazırlanması için 10 mm elekten geçen ve 10 – 14 mm yassılık eleği üzerinde kalan agrega numesi ayrılmış ve yıkanarak sıcaklığı $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ etüvde kurutulmuştur. Tozdan ve nemden arındırılmış numuneler bir kalıpta 36 ile 46 agrega tanesi bulunacak şekilde yerleştirilmiş ve boşlukları ince bir kum tabakası ile doldurulduktan sonra reçine sürülerek kalıp oluşturulmuştur. Her agrega numunesinden üç kalıp oluşturularak cilalanma test makinasına yerleştirilmiştir. Cilalanma test makinasında numunelere su ile 3 saat ince zımpara tozu, 3 saat kalın zımpara tozu akışı sağlanarak cilalanma işlemi yapılmıştır. Cilalanması tamamlanmış numuneler tekerlekten ayrılarak sürtünme test cihazında okunmuştur. Sürtünme testi, sarkaçın yere paralel olacak şekilde sabit bir noktadan serbest düşüş yapması ve ölçme skalasında yükseldiği değer okunarak yapılmaktadır. Cilalanma değeri her numunenin iki yönünden 5 kez okuma yapılarak elde edilen değerlerden birbirine en yakın 3 okumanın ortalamasının hesaplanması ile bulunmaktadır [91].



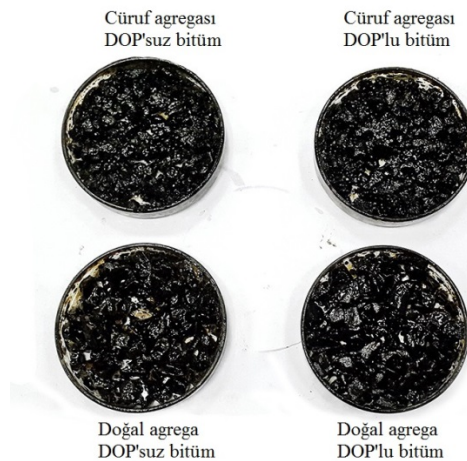
Şekil 6.8: Cilalanma deneyi sürtünme test cihazı.

6.2.1.8 Soyulma mukavemeti

Bir asfalt kaplamanın ömrü, geniş ölçüde, suyun etkisine karşın agregaların yapışma kabiliyetine bağlıdır. Bazı bitümlü karışımlarda, belirli koşullarda agrega ile asfalt arasındaki bağlantının kaybolduğu ve bu yüzden kaplamanın kısa zamanda

bozulduğu görülmektedir. Özellikle suya ilgisi fazla olan agregalar ve sıvı bitümle yapılan karışımlarda bu hal kendini göstermektedir. Soyulma, bağlayıcı maddenin suyun etkisi ile agrega üzerinden ayrılmasına denmektedir. Yüksek viskoziteli bağlayıcılar soyulmaya karşı daha dayanıklıdırlar. Deney, bitümle kaplanmış agreganın 24 saat su içerisinde bekletilmesi ve oluşan soyulmaların gözle tayini şeklinde yapılmaktadır [16].

TS EN 12697-11 standardı kullanılan deneyde, 9,5 – 6,3 mm elekler arası 200 gr alınan numune yıkanarak toz ve kirden arındırılmıştır. Yıkanan numuneler $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüve sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve $100 \pm 0,5$ gr olarak 2 ayrı numune hazırlanmış ve petri kapları içerisine yerleştirilmiştir. Numuneler, soyulmaya karşı mukavemet sağlaması amacıyla katkı maddesi eklenmiş DOP'lu bitüm ve katkı maddesi bulunmayan DOP'suz bitümle kaplanabilmeleri için etüvde 140°C 'ye kadar ısıtılmışlardır. Sıcak karışımın yapılabilmesi için sıcak kum banyosu hazırlanmıştır. Kum üzerinde agrega sıcaklığı korunarak, agrega içine 160°C 'ye kadar ısıtan bitümden $5 \pm 0,1$ gr dökülmüş ve agrega taneleri bitüm ile kaplanıncaya kadar karıştırılmıştır. Karışım, cam çubuk kullanılarak hiçbir sivri köşe kalmayacak şekilde düzeltilmiş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler, soyulma olayının gözlenebilmesi için saf su ile doldurularak 60°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda numuneler (Şekil 6.9) etüvden çıkarılmış ve soyulan taneler gözle seçilerek soyulan tane yüzdesi hesaplanmıştır [92].



Şekil 6.9: Soyulma mukavemeti deney numuneleri.

6.2.1.9 Kil topakları ve ufalanabilir daneler

Deney, agrega yüzeyindeki kil topakları ve ufalanabilir daneleri tespit etmek için yapılmaktadır. Deney ASTM C-142 standardına göre yapılmıştır. Agregada 1,18 - 4,75 mm elek arası 150 gr, 4,75 - 9,5 mm elek arası 1000 gr, 9,5 - 19 mm elek arası 2000 gr, 19 - 25 mm elek arası 3000 gr ayrılarak yıkanmadan $110 \pm 5^\circ\text{C}$ etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığında soğutulularak ayrı ayrı tartılmıştır (A). Tartılan numuneler ayrı tepsilere yerleştirilerek saf su ile doldurulmuş ve 24 ± 4 saat su içerisinde bekletilmiştir. Su içerisinde bekletilen numunelere ait görüntü Şekil 6.10'da verilmiştir. Kil topaklarından ve ufalanabilen danelerden ayrılmış numuneler No. 20, No. 8 ve No. 4 eleklerden elenerek yıkanmıştır. Elek üstünde kalan malzemeler $110 \pm 5^\circ\text{C}$ etüvde kurutulmuş ve ağırlıkları tartılmıştır (B). Dağılan tane oranı Eşitlik 6.12 ile hesaplanmıştır [93].



Şekil 6.10: Kil topakları ve ufalanabilir daneler deney numuneleri.

$$\text{Dağılan tane oranı} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6.12)$$

Burada:

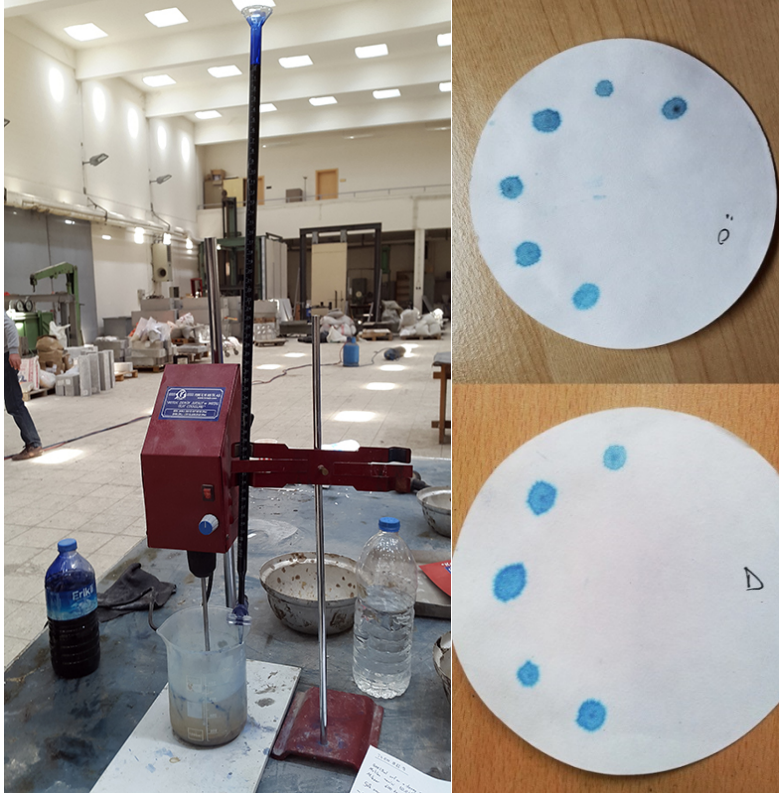
A = İlk kuru ağırlık (g)

B = Son kuru ağırlık (g)

6.2.1.10 Metilen mavisi

Metilen mavisi deneyi ince agregadaki kil miktarının belirlenmesi için yapılmaktadır. Deney, süspansiyon agregaya saf su karışımı içerisine belirli hacimlerde metilen mavisi eklenerek kontrol edilmektedir. Kontrol, çözeltiden alınan sıvının filtre kağıdına damlatılarak kir tutunmamış boya gözlemlenmesi, filtre kağıdı üzerinde iki farklı tonda boya tespiti yapılmasını amaçlamaktadır. Deney TS EN 933-9 standardına göre 2 mm elek altı malzeme ile yapılmıştır. Numune 45 °C sıcaklıktaki etüve kurutulmuş ve 2 mm elekten elenerek, elek üzerinde kalan numune ayrılmıştır. Elek altında kalan malzemeden 200 gr tartılmış ve kaydedilmiştir (A). Metilen mavisi çözeltisi saf su ve saflığı en az %98,5 olan metilen mavisi ile hazırlanmıştır. Her litre saf su için $10,0 \pm 0,1$ gr metilen eklenmiştir.

Deney için cam beher içerisine 500 ml distile su eklenmiştir. Daha sonra beherin içerisine tartılmış olan ince agregaya numunesi dökülmüştür. Karışım, mikser kullanılarak pervane hızı dakikada 600 ± 60 devir olacak şekilde ayarlanmış ve 5 dakika süre ile karıştırılarak süspansiyon karışım elde edilmiştir. 5 dakika sonunda mikser durdurulmuş ve karışım içerisine 5 ml metilen mavisi çözeltisi dökülmüştür. Mikser hızı dakikada 400 ± 40 devire ayarlanarak 1 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karıştırma sonrasında cam çubuk kullanılarak karışım içerisinden bir damla sıvı alınarak filtre kağıdına damlatılmıştır. Filtre kağıdında oluşan leke kontrol edilmiş ve iki farklı tonda boya elde edilinceye kadar karışıma 1'er ml çözelti eklenmiş, 1'er dakika karıştırılmış ve filtre kağıdına damlatılan çözeltiler ile kontrol edilmiştir. Filtre kağıdında ilk tespit edilen 2 farklı tondaki boya 5 dakika boyunca gözlemlenmiş ve açık renkte kaybolma gözlemlenmiş ise karışıma çözelti eklenmeye devam edilmiştir. Filtre kağıdındaki damla izleri 5 dakika içinde kaybolmadığı iki farklı damla ile teyit edilmesi durumunda, çözeltiliye eklenmiş olan metilen mavisi çözeltisinin hacmi kayıt edilmiştir (B). Deney düzeneği ve filtre kağıtları Şekil 6.11'de verilmiştir [94].



Şekil 6.11: Metilen mavisi deneyi.

Metilen mavisi oranı Eşitlik 6.13 kullanılarak hesaplanmıştır [94].

$$\text{Metilen mavisi oranı} = \frac{A}{B} \times 10 \quad (6.13)$$

Burada:

A = Karışıma katılan metilen mavisi çözeltisi (ml.)

B = Numune ağırlığı (g)

6.2.2 Bitümlere uygulanan deneyler

Bitümlü sıcak karışım yapımında kullanılacak olan TÜPRAŞ'tan temin edilmiş B 50/70 sınıfı bitüm için özgül ağırlık deneyi ve penetrasyon deneyi yapılmıştır.

6.2.2.1 Özgül ağırlık

Özgül ağırlık deneyi, belirli hacimdeki bitüm ağırlığının aynı hacimdeki su ağırlığına oranının bulunmasını amaçlamaktadır. Bu deneyde TS EN 15326 standardı kullanılmıştır. Deney 25 °C ortamda piknometre, distile su ve bitüm kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde kullanılacak piknometre temiz ve kuru halde tartılmıştır (A).

Daha sonra piknometre kalibrasyon çizgisine kadar distile su ile doldurulmuş ve tartılmıştır (B). Su ile tartımı yapılan piknometre boşaltılmış, kurutulmuş ve kalibrasyon çizgisinin üçte ikisine kadar bitüm ile doldurularak tartılmıştır (C). Piknometre içerisinde bitüm konurken bitüm içerisinde hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmiştir. Bitüm konulmuş piknometre, kalibrasyon çizgisine kadar distile su ile doldurulmuş ve tartılarak toplam ağırlık kayıt edilmiştir (D). Bitümün özgül ağırlığı Eşitlik 6.14 ile hesaplanmıştır [16], [95].

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{\text{kN}}{\text{cm}^3} = \frac{C - A}{B - A - (D - C)} \quad (6.14)$$

Burada:

A = Piknometre ağırlığı (gr)

B = Kalibrasyon çizgisine kadar su dolu piknometre ağırlığı (g)

C = Kalibrasyon çizgisinin 2/3'üne kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı (g)

D = Piknometre, bitüm ve su ağırlığı (g)

6.2.2.2 Penetrasyon

Penetrasyon deneyi, standart bir iğnenin belirli ısı ve zaman koşullarında numuneye düşey olarak batıldığı derinliğin ölçülmesidir. Penetrasyon deneyi, 25 °C sıcaklıkta 100 gr iğnenin 5 saniye süre ile bitüm numunesine batırılması ile yapılmaktadır. Bir numune için en az 3 farklı noktadan okuma yapılarak ölçülen değerlerin ortalaması alınarak penetrasyon değeri bulunmaktadır. Penetrasyon değeri birimi 1/10 mm'dir. Deney TS EN 1426 standardına göre yapılmıştır.

2 farklı sıcaklıkta, 25 °C'de ve deney yapılan bitümün yumuşama noktası sıcaklığında, yapılan penetrasyon deneyleri ile Eşitlik 6.15 ve Eşitlik 6.16 kullanılarak penetrasyon indeksi hesaplanabilmektedir [96].

$$\text{Penetrasyon indeksi} = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (6.15)$$

Buradaki A Eşitlik 6.16'da,

$$A = \frac{\log(T_1 \text{ penet.}) - \log(T_2 \text{ penet.})}{T_1 - T_2} \quad (6.16)$$

Burada:

$T_1 \text{ penet} = T_1 \text{ sıcaklığındaki penetrasyon değeri (1/10 mm)}$

$T_2 \text{ penet} = T_2 \text{ sıcaklığındaki penetrasyon değeri (1/10 mm)}$

$T_1 = 1. \text{ penetrasyon deneyi sıcaklığı (}^\circ\text{C)}$

$T_2 = 2. \text{ penetrasyon deneyi sıcaklığı (}^\circ\text{C)}$

Bütün bitümlerin yumuşama noktasındaki penetrasyon değeri 800 d-mm'dir ve standart penetrasyon deneyi 25 °C sıcaklıkta yapıldığı için A değerinin alındığı formül olarak Eşitlik 6.17 kullanılabilir.

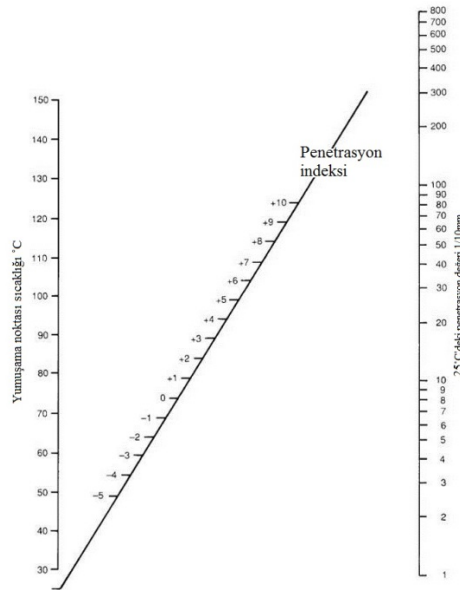
$$A = \frac{\log(25^\circ\text{C penet.}) - \log(800)}{25 - \text{Yumuşama nok. sıcaklığı}} \quad (6.17)$$

Burada:

25 °C penet. = 25 °C'deki penetrasyon değeri (1/10 mm)

Yumuşama nok. sıcaklığı = TS EN 1427 standardı ile bulunan yumuşama noktası sıcaklığı (°C)

Penetrasyon indeksi yumuşama noktası sıcaklığı ile 25°C'de yapılan penetrasyon değeri değeri arasındaki logaritmik bağıntı ile ifade edilmektedir. Bitüm, -5 ile +10 arasında değişen değerlere göre sınıflandırılmaktadır. -5 değeri yüksek ısı hassasiyetini yani küçük sıcaklık değişimlerinden etkilenecek viskozitesinin değişmesini, +10 değeri ise bitümün düşük ısı hassasiyetine sahip olduğunu belirtmektedir. Penetrasyon indeksi cetveli Şekil 6.12'de verilmiştir [27].



Şekil 6.12: Penetrasyon indeksi cetveli [27].

6.3 Marshall Tasarım Yöntemi

Marshall Tasarım Yöntemi, ABD Mississippi Eyalet Otoyolları Departmanı bitüm mühendisi Bruce Marshall tarafından 1940'lı yıllarda geliştirilmeye başlamıştır. Yöntem ABD ordusu mühendisleri tarafından uçak pistlerinde test edilmeye başlanmış, detaylı araştırmalar ve kolerasyon çalışmaları ile Marshall yöntemi oluşturulmuştur. Marshall tasarım yöntemi 1958 yılında D-1559 Bitümlü Karışımlarda Plastik Akmaya Karşı Marshall Yöntemi Kullanımı standardı ile ABD'de karışım dizaynı yöntemi olarak resmileştirilmiştir. Marshall Tasarım Yöntemi sadece sıcak karışımlarda uygulanmaktadır [97].

Marshall Tasarım Yöntemi,

- Sağlam (durabil) bir üstyapı elde etmek için gerekli bitüm miktarını belirlemek
- Trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterli dayanımı oluşturmak
- Sıkıştırılmış tabakada, trafik altında oluşabilecek çok az miktarda sıkışmaya; kuma, akma ve stabilite düşüklüğü olmadan sağlayacak, ancak tabakanın içinde rutubet ve fazla hava barındırmayacak ölçüde boşluğu sağlamak
- Segregasyona uğramadan uygun serimi sağlayacak bir işlenebilirliğine sahip ekonomik bir karışım ve agrega gradasyonunun belirlenmesi amaçları ile kullanılmaktadır [98].

Orijinal Marshall Tasarım Yöntemi agrega boyutu 25 mm ve altındaki karışımlarda kullanılmaktadır ancak modifiye Marshall Tasarım Yöntemi'nde tane boyutları 38 mm'ye kadar alınabilmektedir. Marshall stabilite testi ampirik bir yöntem olması sebebiyle standart prosedürde yapılan herhangi bir değişim, hazırlanan karışım için beklenen performans öngörülerinin sağlanmamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle Marshall Tasarım Yöntemi'nde kullanılacak malzemelerin tamamı projede belirlenen fiziksel gereklilikleri sağlamalı, agrega karışım granülometresinin projede belirtilen gradasyon limiti aralığında olması, yoğunluk ve boşlukların analizi için karışımda kullanılan agrega sınıflarının hacim özgül ağırlıkları ve bitümün özgül ağırlığı bilinmelidir. Deney TS EN 12697 standardına göre yapılar hazırlanan

briketlerin TS 3720 Bitümlü Karışımlar Asfalt Betonu Karışım Tasarımı Hesap Esasları Marshall Yöntemi'nde belirtilen D_t (teorik özgül ağırlık), V_h (hava boşluğu), VMA (agregalar arası boşluk), V_f (asfaltla dolu boşluk), briket yüksekliğine göre düzeltilmiş stabilite ve ortalama stabilite ve akma değerleri hesaplanarak yapılmıştır [97], [98].

6.3.1 Briketlerin hazırlanması

Briket terimi, TS EN 12697-30 standardında ölçüleri verilen, iç çapı $101,6 \pm 0,1$ mm olan silindir kalıp içerisinde hazırlanmış olan bitümlü karışımı ifade etmekte kullanılmaktadır. Marshall kalıplarına ait görüntü Şekil 6.13'de verilmiştir. Bitümlü karışım hazırlanmasında kullanılacak agreganın gradasyonu KTŞ 2013 Kısım 407 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakaları'nda belirtilen gradasyon limitlerine göre hazırlanmıştır. Doğal agregaya ile hazırlanan briketlerde agregaya karışımı kütlesi 1200 gr, EAO cürufu ile hazırlanan briketlerde cüruf özgül ağırlığının doğal agregaya göre %20 daha fazla olması nedeniyle aynı hacimde numune elde edilebilmesi için 1450 gr cüruf agregası kullanılmıştır. Marshall Tasarım Yöntemi optimum bitüm yüzdesinin bulunmasını içermektedir. Optimum bitüm yüzdesinin tayini karışım agregaya kütlesine göre değişen yüzdelerde bitüm eklenerek hazırlanan farklı numunelerden elde edilen sonuçlara göre yapılmaktadır. Genel olarak yapılan çalışmalarda bitüm yüzdesi 0,5 oranında arttırılmaktadır. Bu çalışmada optimum bitüm yüzdesinin tayini için karışımlarda, karışım kütlelerine göre %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0, %6,5 ve %7,0 oranlarında bitüm eklenerek briketler hazırlanmıştır. Her bitüm yüzdesi için üç briket numune hazırlanmıştır. Doğal agregaya ve cüruf agregası ile 7 farklı bitüm yüzdesi için 21'er briket, toplamda 42 briket hazırlanmıştır.



Şekil 6.13: Marshall kalıpları.

Marshall numuneleri sıcak karışım olarak yapılmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma işlemleri için uygun sıcaklık aralığı, kullanılan bitümün 280 ± 30 santistok kinematik viskozite değerinin sağlandığı aralıktır. Uygun değerlerinin bulunması ile karışımın yapılacağı sıcaklık belirlenmiştir. Briketlerin hazırlanmasına, agregaların KTŞ 2013’de belirtilen gradasyon limitlerine göre karıştırılması ile başlanmıştır. Hazırlanan agregalar karışımları etüve yerleştirilerek uygun karışım sıcaklığına gelinceye kadar ısıtılmıştır. Karışıma eklenecek bitüm 170 ± 20 santistok kinematik viskozite değerinin sağlandığı sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Isıtılan agregalar hassas teraziye konmuş ve içerisine belirlenen yüzde bitüm eklenmiştir. Agregalar bitüm karışımı mikserde yerleştirilmiş ve agregaların tüm yüzeyi bitüm ile kaplanınca kadar karıştırma işlemi yapılmıştır. Karışımın içerisine yerleştirileceği Marshall kalıpları önceden ısıtılmış ve kalıbın alt ve üst yüzeylerine filtre kağıdı konulmuştur. Karışım sıcaklığı kontrol edilerek, Marshall kalıbı içerisine 3 eşit katman olacak şekilde sıra ile dökülmüş ve her katman 25 şiş darbesi ile karıştırılmıştır. Briket hazırlanmasına ait işlemler Şekil 6.14’te gösterilmiştir.



Şekil 6.14: Briket hazırlanması.

Marshall kalıbına dökülen sıcak karışım, Marshall tokmağı ile iki tarafına KTŞ 2013’de belirtildiği üzere 75 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Marshall tokmağının bir darbesi, 4536 gr ağırlığı 457,2 mm yükseklikten 3315 gr ağırlığındaki tokmağın üzerine düşürmesi olarak gerçekleşmektedir. Sıkıştırılan briketler, soğumaları için

oda sıcaklığında bekletilmişlerdir. Marshall tokmağı ve sıkıştırılmış briketlere ait görüntü Şekil 6.15’de verilmiştir.



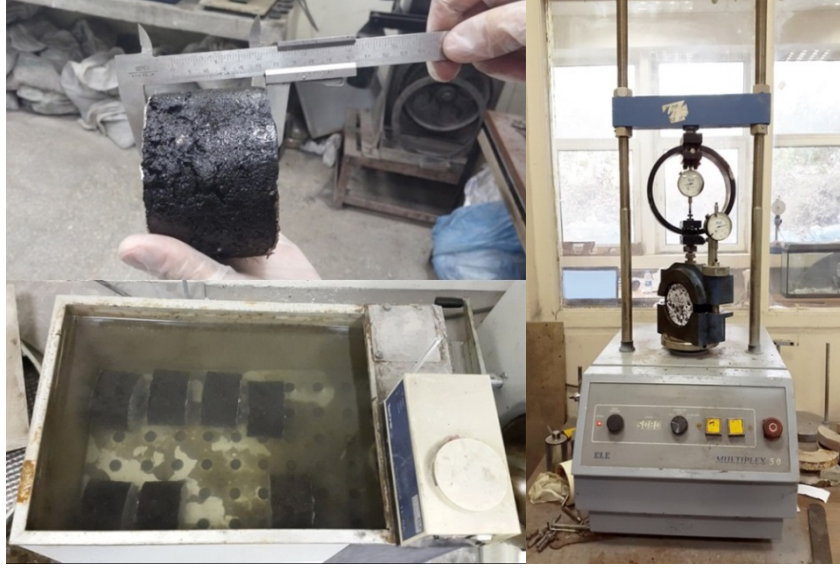
Şekil 6.15: Marshall tokmağı ve briketler.

6.3.2 Marshall akma ve stabilite okumaları

Marshall stabilite ve akma okumaları 50,80 mm/dk’lık hızla yükleme yapılan test cihazı ile yapılmaktadır. Numune $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki banyoda 30 dakika bekletildikten sonra sıkıştırma kalıbı içerisine yerleştirilerek yükleme yapılmaktadır. Yükleme sırasında basınç stabilometreden, deformasyon ise akma ölçerden okunmaktadır. Stabilometrede okunan değere Marshall Stabilitesi, akma ölçerde okunan değere Akma denilmektedir.

Marshall sıkıştırması TS EN 12697-34 standardına göre yapılmıştır. Marshall tokmağında iki tarafa 75 darbe uygulanarak sıkıştırılmış ve oda sıcaklığında soğutulmuş numunler, kriko kullanılarak kalıplardan çıkarılmıştır. Her bir numune ait olduğu özellikleri belirtmek üzere numaralandırılmıştır. Her numunenin yüksekliği kumpas kullanılarak 3 farklı noktadan okunmuş ve havadaki, sudaki ve doymun kuru yüzey durumdaki ağırlıkları tartılarak kaydedilmiştir. Yükleme yapılacak numuneler belirli aralıklarla $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki banyoya yerleştirilmiş ve 30 dakikadan sonra banyodan çıkarılarak sıkıştırma kalıbı içerisine yerleştirilmiştir. Sıkıştırma kalıbı üzerine akma ölçer yerleştirilerek kalıp, test makinasında dakikada 50,80 mm yükleme yapılarak sıkıştırılmış ve basıncın

okunduğu stabilometrede kırılma noktasına kadar olan maksimum değeri okunmuştur. Kırılma noktası, stabilometrede okunan basınç değeri azaldığı an olarak değerlendirilmektedir. Bu esnada numune parçalanmakta ve dayanımı azalmaktadır. Marshall akma ve stabilite deneyine ait görseller Şekil 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.16: Marshall akma ve stabilite deneyi.

6.3.3 Yoğunluk ve boşluk analizleri

Marshall Tasarım Yöntemi, hazırlanan agrega karışımlarına ve bitümlü sıcak karışımlara ait yoğunluklara ve farklı şekillerde tanımlanmış boşluk miktarlarının bilinmelerini gerektirmektedir.

6.3.3.1 Agrega karışımının tane yoğunluğunun hesaplanması

Agrega özgül ağırlık deneyleri ile kaba agrega, ince agrega ve filler malzeme için özgül ağırlık değerleri ayrı ayrı elde edilmektedir. Agrega karışım tane yoğunluğu, farklı boyutlardaki agregalar ile hazırlanmış karışımın yoğunluğunu ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan Marshall briketleri, KTŞ 2013’de belirtilen binder tabakası gradasyon limitlerine göre hazırlanmıştır. Hazırlanmış agrega karışımlarına ait hacim özgül ağırlık ve görünen özgül ağırlık değerleri TS 3720’de belirtilen Eşitlik 6.18 ve Eşitlik 6.19 ile hesaplanmıştır [99].

$$q_{h,k} = \frac{\frac{P_{kaba}}{q_{h,kaba}} + \frac{P_{ince}}{q_{h,ince}} + \frac{P_{filler}}{q_{h,filler}}}{\frac{P_{kaba}}{q_{h,kaba}} + \frac{P_{ince}}{q_{h,ince}} + \frac{P_{filler}}{q_{h,filler}}} \quad (6.18)$$

$$q_{z,k} = \frac{\frac{P_{kaba}}{q_{z,kaba}} + \frac{P_{ince}}{q_{z,ince}} + \frac{P_{filler}}{q_{z,filler}}}{\frac{P_{kaba}}{q_{z,kaba}} + \frac{P_{ince}}{q_{z,ince}} + \frac{P_{filler}}{q_{z,filler}}} \quad (6.19)$$

Burada:

$q_{h,k}$ = Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{z,k}$ = Agrega karışımının görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

P_{kaba} = Karışım içerisindeki kaba agreganın ağırlıkça yüzdesi

P_{ince} = Karışım içerisindeki ince agreganın ağırlıkça yüzdesi

P_{filler} = Karışım içerisindeki filler malzemenin ağırlıkça yüzdesi

$q_{h,kaba}$ = Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{h,ince}$ = İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{h,filler}$ = Filler malzemenin hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{z,kaba}$ = Kaba agreganın görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{z,ince}$ = İnce agreganın görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{z,filler}$ = Filler malzemenin görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

6.3.3.2 Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı

Bitümlü karışımın özgül ağırlığı, numunenin birim ağırlığının aynı koşullarda birim distile suyun ağırlığına oranı olarak ifade edilmektedir. Her bir numunenin özgül ağırlığı, o numunenin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey durumundaki ağırlıkları kullanılarak elde edilmiştir. Bitümlü karışımların özgül ağırlıkları Eşitlik 6.20 kullanılarak hesaplanmıştır [99].

$$q_{pratik} = \frac{A}{B - C} \quad (6.20)$$

Burada:

q_{pratik} = Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı (kN/cm³)

A = Numunenin kuru ağırlığı (g)

B = Numunenin doymuş kuru yüzey durumdaki ağırlığı (g)

C = Numunenin sudaki ağırlığı (g)

6.3.3.3 Bitümlü karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı

Deney için hazırlanan bitümlü karışımların içerisinde, sıvı maddelerin ulaşamadığı sıkışmış hava boşlukları bulunmaktadır. Maksimum teorik özgül ağırlık, hazırlanmış karışım içerisinde hiç hava boşluğu bulunmayan, sadece bitüm ve agrega karışımının özgül ağırlığını ifade etmektedir. Maksimum teorik ağırlık Eşitlik 6.21 ve Eşitlik 6.22 kullanılarak hesaplanmıştır [99].

$$q_{\max} = \frac{100 + P_{\text{bitüm}}}{\frac{100}{G_{\text{ef}}} + \frac{P_{\text{bitüm}}}{q_{\text{bitüm}}}} \quad (6.21)$$

$$G_{\text{ef}} = \frac{q_{\text{h.k}} + q_{\text{z.k}}}{2} \quad (6.22)$$

Burada:

$q_{\max}$ = Karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_{ef} = Bitümlü karışım içerisindeki agreganın görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

$P_{\text{bitüm}}$ = Bitümlü karışım içerisindeki bitümün ağırlıkça yüzdesi

$q_{\text{bitüm}}$ = Bitümlü karışım içerisindeki bitümün özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{\text{h.k}}$ = Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

$q_{\text{z.k}}$ = Agrega karışımının görünen özgül ağırlığı (kN/cm³)

6.3.3.4 Sıkıştırılmış bitümlü karışımında hava boşluğu yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış bitümlü karışımında hava boşluğu, hazırlanmış bitümlü karışımın sıkıştırma işlemi karışım içerisinde sıkışmış hava boşluklarını ifade etmektedir. Bu boşluklar TS 3720 standardına göre eşitlik 6.21 kullanılarak hesaplanmıştır [99].

$$V_h = \frac{q_m - q_p}{q_m} \times 100 \quad (6.22)$$

Burada:

V_h = Sıkıştırılmış bitümlü karışımda hava boşluğu yüzdesi

q_m = Bitümlü karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı

q_p = Bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı

6.3.3.5 Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki agregalar arası boşluk yüzdesinin hesaplanması

Agregalar arası boşluk, sıkıştırılmış karışım içerisindeki agregat taneleri arasındaki hava ve efektif bitüm içeren boşluklar olarak tanımlanmaktadır. Agregalar arası boşluk toplam hacmin yüzdesi olarak ifade edilmektedir ve agregat karışım hacim özgül ağırlığından yararlanılarak sıkıştırılmış karışımın hacimi yüzdesi cinsinden hesaplanmaktadır. Agregalar arası boşluk yüzdesi TS 3720 standardına göre Eşitlik 6.23 kullanılarak hesaplanmıştır [99].

$$VMA = 100 - \frac{q_p \times P_k}{q_{h,k}} \quad (6.23)$$

Burada:

VMA = Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki mineral agregalar arası boşluk yüzdesi

q_p = Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı (kN/cm^3)

P_k = Bitümlü karışım içerisindeki agreganın ağırlıkça yüzdesi

$q_{h,k}$ = Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)

6.3.3.6 Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki bitümle dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki bitümle dolu boşluk yüzdesi, sıkıştırılmış karışım içerisinde agregalar arası boşlukların bitüm ile doldurulmuş miktarını belirtmektedir ancak agregalar tarafından emilen bitüm miktarını içermemektedir. Bitümle dolu boşluk yüzdesi TS 3720 standardına göre Eşitlik 6.22 kullanılarak hesaplanmıştır [99].

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (6.22)$$

Burada:

V_f = Bitümle dolu boşluk yüzdesi

VMA = Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki mineral agregalar arası boşluk yüzdesi

V_h = Sıkıştırılmış bitümlü karışımda hava boşluğu yüzdesi

6.3.4 Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi

Optimum bitüm yüzdesi, farklı bitüm miktarları ile hazırlanmış numunelerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile hesaplanan değerdir. Numunelere ait yoğunluk ve boşluk analizleri ve Marshall stabilite ve akma okumaları ile bu değerlerin ait olduğu bitüm yüzdesi grafik olarak çizilmektedir. Çizilen grafikler, optimum bitüm yüzdesi belirlenmesinde kullanılmaktadır. Optimum bitüm yüzdesi, tasarlanan karışımın, gerek duyulan koşulları sağlayacağı şekilde belirlenmelidir. Bu çalışma için gerek koşullar KTŞ 2013’de belirtilen Asfalt Betonu Dizayn Kriterleri tablosunda yer almaktadır. (Çizelge 3.19).

TS 3720 standardına göre, optimum bitüm yüzdesi olarak karışımın şartnamede belirtilen hava boşluğu sınırının orta noktasına karşılık gelen bitüm içeriğinin seçilmesi önerilmektedir. Bu bitüm yüzdesinde hesaplanmış ve deneyle tayin edilmiş karışım özellikleri grafikten bulunmaktadır. Bulunan değerler karışımın şartnamede belirtilen gereksinimlerini karşılıyorsa, bu bitüm oranı optimum bitüm olarak belirlenmektedir. Aksi takdirde, bitüm içeriğinde bazı değişiklikler yapılması veya karışımın yeniden tasarlanması gerekmektedir [99].

Optimum bitüm miktarı, çizilen grafiklerde şartname limitlerini sağlayan agregalar arası boşluk miktarı, bitümle dolu boşluk miktarı, hava boşluğu miktarı ve stabilite değerlerinin kesişim aralıkları belirlenerek de hesaplanabilmektedir. Her grafikte şartname limiti içerisinde kalan aralığın ortalaması alınarak optimum bitüm yüzdesi miktarı elde edilmektedir.

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Bu çalışmada, EAO cürufu, İstanbul Ömerli bölgesinden temin edilen doğal agrega ve bitüm kullanılmıştır. Çalışma EAO cürufunun performansının belirlenmesine yönelik bir araştırma olup, elde edilen sonuçların doğal agrega ile karşılaştırılmasını içermektedir. Deneyler KTŞ 2013’de belirtilen standartlara göre cüruf agregası ve doğal agrega için ayrı ayrı yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan doğal agrega ve EAO cürufuna ait İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü tarafından yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 7.1’de verilmiş ve EAO cürufu içerisinde ağır metal olmadığı tespit edilmiştir. ASTM D4792 standardı uyarınca numuneye yapılan potansiyel genleşme deneyinde %0,5’in üzerinde bir değişim gözlenmemiştir.

Çizelge 7.1: Doğal agrega ve EAO cürufu kimyasal analiz sonuçları.

	Numune Adı	
	EAO cürufu	Doğal agrega
Metalik Fe	2,94	0,24
Toplam Fe	34,43	0,78
FeO	31,49	0,54
SiO ₂	13,34	0,92
Al ₂ O ₃	4,55	0,42
Toplam CaO	30,07	32,50
Serbest CaO	0,49	0,17
MgO	4,75	22,05
MnO	5,64	0,05

7. 1 Agrega Deneyleri

Agrega deneyleri KTŞ 2013 Kısım 407 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakaları’nda belirtilen standartlara göre EAO cürufu ve doğal agrega numuneleri ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar şartname limit değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Doğal agreganın ve EAO cürufu agregasının fiziksel ve mekaniksel özellikleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2: Doğal agreganın ve EAO cürufu agregasının fiziksel ve mekaniksel özellikleri.

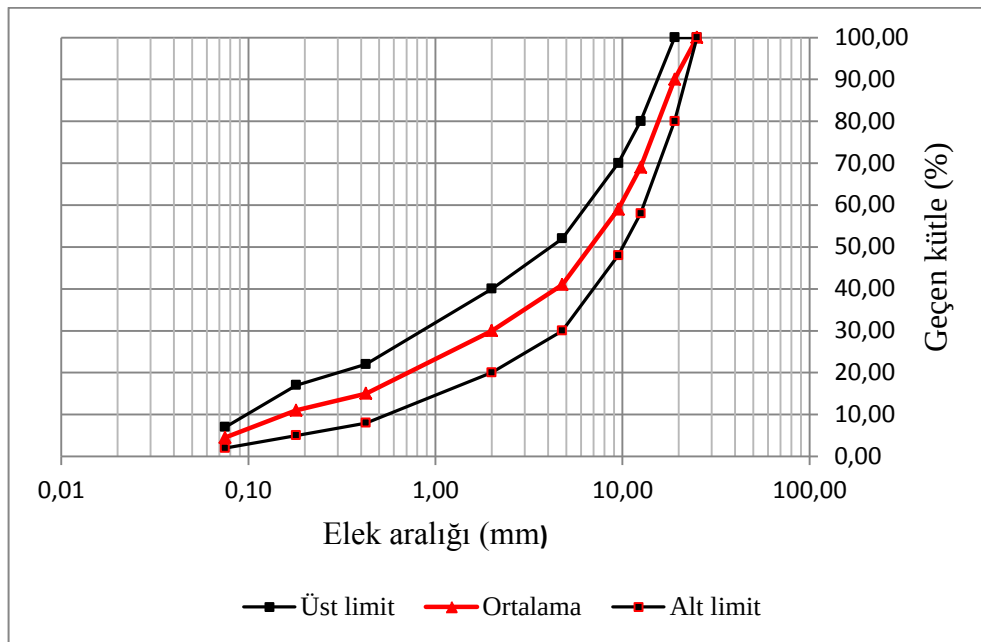
Özellik	Deney standardı	Şartname limiti	Deney sonucu	
			Doğa	EAO cürufu
Kaba agregalar için hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C127		2,77	3,22
Kaba agregalar için görünen özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C127		2,80	3,45
İnce agregalar için hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C128		2,81	3,46
İnce agregalar için görünen özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C128		2,85	3,72
Filler malzeme için hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C128		2,81	3,66
Parçalanma direnci, % kayıp	ASTM C131	≤30,0	20,6	21,3
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, %	TS EN 1367-2	18	0,13	2,04
Kırılmışlık, ağırlıkça %	TS EN 933-5	≥95 - ≤0	100	100
Yassılık indeksi, %	BS 812	≤30,0	14,12	8,63
Cıalanma değeri, %	TS EN 1097-8	≥35	51,1	62
Kaba agrega su emme, %	ASTM C127	≤2,5	0,43	2,08
İnce agrega su emme, %	ASTM C128	≤2,5	0,48	2,19
Soyulma mukavemeti (DOP'lu), % bitümle kaplı yüzey	TS EN 12697-11	≥60	90-95	85-90
Soyulma mukavemeti (DOP'suz), % bitümle kaplı yüzey	TS EN 12697-11	≥60	65-75	70-80
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, %	ASTM C142	≤ 0,3	0,37	0,13
Metilen mavisi, gr/kg	TS EN 933-9	≤ 1,5	0,5	0,4

7.1.1 Elek analizi deneyi sonucu

Çalışmada kullanılan EAO cürufu düzensiz granülometride atık olarak sınıflandırılan bir malzemedir. Elektrik ark ocağı cürufu ve İstanbul Ömerli bölgesinden temin edilen doğal agrega, deney çalışmalarında ve Marshall tasarım yönteminde kullanılmak üzere KTŞ 2013’de belirtilen binder tabakası gradasyon limitleri çizelgesine göre sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılan granülometri limitleri, şartname alt ve üst limitlerinin ortalaması olarak kullanılmıştır. Çalışmaya ait granülometri limitleri Çizelge 7.3’de ve granülometri eğrisi Şekil 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.3: Çalışmada kullanılan granülometri limitleri [33].

Elek açıklığı		% geçen		
mm	inç	Minimum	Maksimum	Kullanılan
25	1	100	100	100
19	3/4	80	100	90
12,5	1/2	58	80	69
9,5	3/8	48	70	59
4,75	No.4	30	52	41
2,00	No.10	20	40	30
0,425	No.40	8	22	15
0,180	No.80	5	14	10
0,075	No.200	2	7	5



Şekil 7.1: Çalışmada kullanılan granülometri eğrisi.

7.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyi sonucu

Özgül ağırlık tayini kaba agreg, ince agreg ve filler malzemesi için yapılmıştır. Kaba agreg ve ince agreg için elde edilen sonuçlar ve deney standartları Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlarda EAO cürufunun özgül ağırlığı, doğal agreganın özgül ağırlığına göre yaklaşık %20 daha fazladır.

Çizelge 7.4: Kaba ve ince agregâ özgül ağırlık değeri.

	Kaba agregâ			İnce agregâ		
	Standart	Hacim özgül ağırlık gr/cm ³	Görünen özgül ağırlık gr/cm ³	Standart	Hacim özgül ağırlık gr/cm ³	Görünen özgül ağırlık gr/cm ³
Doğal agregâ	ASTM	2,77	2,80	ASTM	2,81	2,85
EAO cürufu	C127	3,22	3,45	C128	3,46	3,72

Filler malzemesi için yapılan özgül ağırlık deneyi sonucu ve standardı Çizelge 7.5’de verilmiştir. EAO cürufu oluşumu sebebiyle içerisinde fazla miktarda hava boşlukları bulundurmaktadır. Tane boyutlarının küçülmesi ile cüruf yapısında sıkışmış hava kabarcıkları azalmakta, dolayısıyla cüruf agregasının özgül ağırlığı artmaktadır.

Çizelge 7.5: Filler malzemesi özgül ağırlık değeri.

	Standart	Hacim özgül ağırlık gr/cm ³
Doğal agregâ		2,81
EAO cürufu	ASTM C128	3,66

Su emme oranı, agregâ içerisindeki sıvı emilimi ile dolabilen boşlukları ifade etmektedir. Yüksek su emme oranına sahip agregalar, boşluklu yapıya sahiptir. Agregâ bünyesine emilen su, bitümlü kaplamalarda agregâ ile bitüm bağının zayıflamasına neden olmaktadır. Kaba agregâ ve ince agregâ malzemeleri için belirlenen maksimum su emme değeri % 2,5 olarak belirtilmiştir. Yapılan deneylerde EAO cürufunun ve doğal agregânın belirtilen limitlerin altında olduğu saptanmıştır. Doğal agregânın su emme oranı yaklaşık % 0,45 iken, boşluklu yapıya sahip EAO cürufunda bu oran yaklaşık % 2,13’tür. Agregaların içerisinde sıkışmış büyük hava kabarcıkları, tane boyutlarının küçülmesi ile azalmakta olsa da, agregaların yüzey alanı artmakta olduğu için emilim miktarı artmaktadır. Boşluk oranı fazla olan EAO cürufu ile yapılan bitümlü karışımlarda, agregâ içerisine emilen bitüm miktarı doğal agregâya göre daha fazla olmaktadır. Kaba agregâ ve ince agregâ için su emme yüzdeleri ve deney standartları Çizelge 7.6’te verilmiştir.

Çizelge 7.6: Kaba agrega ve ince agrega su emme oranları.

	Kaba agraga			İnce agrega		
	Standart	Şartname	Su	Standart	Şartname	Su
		limiti %	emme %		limiti %	emme %
Doğal agrega	ASTM	≤2,50	0,43	ASTM C128	≤2,50	0,48
EAO cürufu	C127		2,08			2,19

7.1.3 Los Angeles deneyi deneyi sonucu

Los Angeles deneyi, trafik yükünün oluşturduğu mekanik etkiler sebebiyle karışım içersindeki parçalanmış tane miktarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Parçalanma direnci düşük olan malzeme kırılmaya daha yatkındır ve karışımın mukavemetini düşürmektedir. Deney ASTM C131 standardına göre yapılmıştır. KTŞ 2013’de binder tabakası için Los Angeles parçalanma kaybı değerinin % 30’un altında olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan deneylerde EAO cürufu ve doğal agreganın parçalanma direnci, şartname limitinin üzerinde çıkmıştır. Los Angeles deneyine ait standart ve bulunan değerler Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7: Los Angeles deneyi sonuçları.

	Standart	Şartname	Parçalanma
		limiti %	kayıbı %
Doğal agrega	ASTM	≤30,0	20,6
EAO cürufu	C131		21,3

7.1.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonucu

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık testi, agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında, laboratuvarında kısa süre içinde bir karar verebilmek amacı ile uygulanan hızlandırılmış bir deneydir. TS EN 1367-2 standardına göre yapılan deney, magnezyum sülfat çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. Çözelti içerisinde doymuş hale getirilen agregaların kurutulması ve agrega boşlukları içerisinde tuz yapısında kalan magnezyum sülfatın çözelti ile tekrar teması, magnezyum sülfat tuzlarının şişmesine neden olmaktadır. Şişme ile oluşan kuvvet, agregaları parçalamaktadır. Agreganın boşluklu yapıda olması, su emme yüzdesinin fazla olması hava tesirine karşı dayanıklılığını düşürmektedir. KTŞ 2013’de binder tabakası için kayıp değerinin üst limiti % 18 olarak belirtilmiştir. Yapılan deneyde

doğal agregada oluşan kayıp % 0,13, EAO cürufunda ise % 2,04 olarak bulunmuş. Kullanılan iki malzeme de şartname limitlerinin altında sonuç vermiştir. Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyine ait standart ve sonuçlar Çizelge 7.8’de verilmiştir [16].

Çizelge 7.8: Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi.

	Standart	Şartname limiti %	Kayıp değer %
Doğal agregası	TS EN 1367-2	18	0,13
EAO cürufu			2,04

7.1.5 Kırılmışlık oranı deneyi sonucu

KTŞ 2013’de karışma giren kaba agreganın en az % 95’inin tüm yüzeyleri kırılmış olmalı, hiçbir yüzeyi kırılmamış agrega bulunmaması istenmektedir. Doğal agrega taş ocağından getirildikten sonra İTÜ İnşaat Fakültesi Ulaştırma Anabilim Dalı Laboratuvarı’nda bulunan konkasör kullanılarak kırılmıştır. İncelenen numunelerin tamamı kırılmış olarak tespit edilmiş ve doğal agrega için kırılmışlık oranı % 100 olarak belirlenmiştir. EAO cürufu, çelik üretimi sonrasında sıcak olarak oluşmakta ve stok sahalarında su ile soğutulmaktadır. Sıcak cüruf üzerine püskürtülen su, cürufun pürüzlü yapıda soğumasına neden olmaktadır. EAO tesislerinde cüruf içerisinde kalmış olabilecek demirin tekrar işleme sokulması, üretim verimliliğini arttıran bir adımdır bu sebeple soğumuş cüruf, çelikhane tesislerinde kırılmakta ve manyetik banttı geçirilerek demir içeren artıklar toplanmaktadır. Temin edilen cürufun tesislerde kırılmış olması ve bu çalışmada ihtiyaç duyulan küçük ebatlı tanelerin elde edilmesi için konkasörde kırılmış olması malzemenin köşeli ve pürüzlü yapıda olmasını sağlamıştır. Yapılan incelemede tüm malzemenin kırılmış olduğu tespit edilmiş ve EAO cürufu için kırılmışlık oranı %100 olarak kabul edilmiştir.

7.1.6 Yassılık indeksi deneyi sonucu

Yassı agrega şekil olarak ince ve uzun yapıda olan tanelerdir. Yassı agrega taneleri üstyapı tabakalı içinde diğer agrega tanelerine göre daha kolay kırılmakta ve tabakanın dayanımını düşürmektedir. Yassı taneler sıkıştırma işlemi sırasında ve trafik yükünün oluşturduğu kuvvetler ile kırılabilmektedir. Bu sebeple üstyapı

tabakalarında yassı agrega miktarının az olması istenmektedir. KTŞ 2013’de binder tabakası için yassılık indeksi değerinin % 30’un altında olması gerekmektedir. BS 812 standardına göre yapılan yassılık indeksi deneyinde, doğal agreganın yassılık indeksi % 14, EAO cürufunun yassılık değeri % 9 olarak belirlenmiştir. Deney standardı, şartname limiti ve bulunan değerler Çizelge 7.9’de verilmiştir.

Çizelge 7.9: Yassılık indeksi deneyi.

	Standart	Şartname limiti %	Kayıp değer %
Doğal agrega	BS 812	≤30	14,12
EAO cürufu			8,63

7.1.7 Cilalanma değeri deneyi sonucu

Cilalanma değeri, agrega tanelerinin sürekli olarak taşıt lastikleri tarafından aşındırılması nedeniyle oluşan cilalanmayı belirlemek için yapılmaktadır. Agregaların cilalanması yüzey sürtünme katsayısının azalmasına neden olmakta ve taşıt ile yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Cilalanmış yüzeyi olan bir kaplama sürüş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Cilalanma değeri deneyi TS EN 1097-8 standardına göre yapılmıştır. KTŞ 2013’de binder tabakası için sınır değer 35 ve üzeri olarak verilmiştir. Yapılan okumalarda EAO cürufunun cilalanma değeri % 62,00 olarak belirlenmiştir. Bu değer, EAO cürufunun cilalanmaya karşı yüksek dirençli olduğunu göstermektedir. Cilalanma değeri deneyi sonuçları ve standardı Çizelge 7.10’da verilmiştir.

Çizelge 7.10: Cilalanma değeri deneyi.

	Standart	Şartname limiti %	Sonuç değeri %
Doğal agrega	TS EN 1097-8	≥35	62,0
EAO cürufu			51,1

7.1.8 Soyulma mukavemeti deneyi sonucu

Soyulma, agrega yüzeyine adezyon kuvveti ile bağlanmış agreganın su etkisiyle agrega yüzeyinden ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Soyulma olayı, kaplamanın geçirimsizliğini bozmakta, agregaların kaplamadan sökülmesine neden olmaktadır.

Esnek tip üstyapı tabakalarında, bitümlü karışımlarda kullanılan tüm agreganın bitüm ile kaplanmış olması istenmektedir. Agregası ile bitüm arasındaki yapışma soyulma mukavemetini etkilediği gibi, kullanılan bitümün yapısı da önemli bir etkidir. Soyulmaya karşı eklenen katkı maddeleri ile hazırlanan bitüme DOP'lu bitüm, herhangi bir katkı maddesi bulunmayan bitüme DOP'suz bitüm denilmektedir. TS EN 12697-11 standardına göre yapılan deneyde doğal agrega ve cüruf agregası için DOP'lu ve DOP'suz bitümler kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda DOP'lu bitümle hazırlanan numunelerin DOP'suz bitüm numunelerine göre daha mukavemetli oldukları tespit edilmiştir. KTŞ 2013 şartname limiti ve deney sonuçları Çizelge 7.11'de verilmiştir. Soyulma DOP'lu bitüm numunelerinde cürufu daha fazla, DOP'suz numunelerde ise agregada daha fazla tespit edilmiştir.

Çizelge 7.11: Soyulma mukavemeti deneyi.

	DOP'lu bitüm numunesi			DOP'suz bitüm numunesi		
	Standart	Şartname limiti %	Soyulma mukavemeti %	Standart	Şartname limiti %	Soyulma mukavemeti %
Doğal agrega	TS EN	≥ 60	90 - 95	TS EN	≥ 60	65 - 75
EAO cürufu	12697-11		85 - 90	12697-11		70 - 80

7.1.9 Kil topakları ve ufalanabilir daneler deneyi sonucu

Kil topakları ve ufalanabilir daneler deneyi, agrega karışımı içerisindeki plastikliği arttırıcı maddelerin miktarını tespit edilmesi için yapılmaktadır. Kaba agrega içerisinde kil topakları ve ufalanabilir daneler olması, hazırlanan karışımın dayanımı düşürmektedir. Deney ASTM C142 standardına göre yapılmıştır. KTŞ 2013'de kil topakları ve ufalanabilir daneler limiti % 0,3 veya daha az olarak belirtilmiştir. Doğal agrega numunesinden elde edilen sonuç % 0,37'dir. Bu sebeple doğal agrega numunesi şartname koşulunu sağlayamamıştır. EAO cürufu oluşum şekili nedeniyle içerisinde kil topağı bulundurmamaktadır ve dağılabilen dane oranı % 0,13'tür. EAO cürufu şartnamede belirtilen koşulu sağlamaktadır. Kil topakları ve ufalanabilir daneler deneyi standardı ve sonuçları Çizelge 7.12'de verilmiştir.

Çizelge 7.12: Kil topakları ve ufalanabilir daneler.

	Standart	Şartname	Ufalanabilir
		limiti %	daneler %
Doğal agrega	ASTM C142	$\leq 0,3$	0,37
EAO cürufu			0,13

7.1.10 Metilen mavisi deneyi sonucu

Metilen mavisi deneyi ince agregadaki kil miktarını belirlemek için yapılmakta ve kilogram numune başına kullanılan metilen mavisi çözeltisi gramı olarak ifade edilmektedir. Kil tayini için kullanılan metilen mavisi çözeltisinin miktarı, numunede bulunan kil miktarı olarak ifade edilmektedir. KTŞ 2013’de metilen mavisi üst limit değeri 1,5 gr/kg olarak belirtilmiştir. TS EN 933-9 standardına göre yapılan deneyde doğal agrega için metilen mavisi miktarı 0,5 gr/kg, EAO cürufu için 0,4 gr/kg olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan her iki numune de şartname koşulunu sağlamaktadır. Deney standardı ve deney sonuçları Çizelge 7.13’de verilmiştir.

Çizelge 7.13: Metilen mavisi deneyi.

	Standart	Şartname	Metilen
		limiti gr / kg	Mavisi gr / kg
Doğal agrega	TS EN 933-9	$\leq 1,5$	0,5
EAO cürufu			0,4

7.2 Bitüm Deneyleri

Bu çalışmada TÜPRAŞ’tan temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bitüm deneyleri ile penetrasyon değeri kontrol edilmiş ve Marshall tasarım yöntemi hesapları için ihtiyaç duyulan bitümün özgül ağırlığı tespit edilmiştir. Deneyler Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 Kısım 412 Bitümlü Bağlayıcılar’da belirtilen standartlara göre yapılmıştır.

7.2.1 Penetrasyon değeri

Penetrasyon deneyi, bitümün belirli koşullar altındaki fiziksel özelliğini tayin etmek için yapılmaktadır. Aynı koşullar altında farklı yapıdaki bitümlere uygulanan deneylerde, penetrasyon değeri yüksek olan numunelerin viskozitesi daha düşüktür

yani moleküller arası kohezyon kuvveti daha azdır. Penetrasyon değeri deneyi TS EN 1426 standardına göre yapılmıştır. Okumalar 0,1 mm biriminde yapılmış ve elde edilen okumaların ortalaması alınmıştır. Kullanılan bitüme ait penetrasyon değeri 58.3 olarak tespit edilmiştir. Bu değer KTş 2013’de belirtilen kaplama sınıfı bitümlerin penetrasyon sınıf aralıklarına göre 50/70 değerleri arasında kaldığı teyit edilmiştir.

7.2.2 Özgül ağırlık

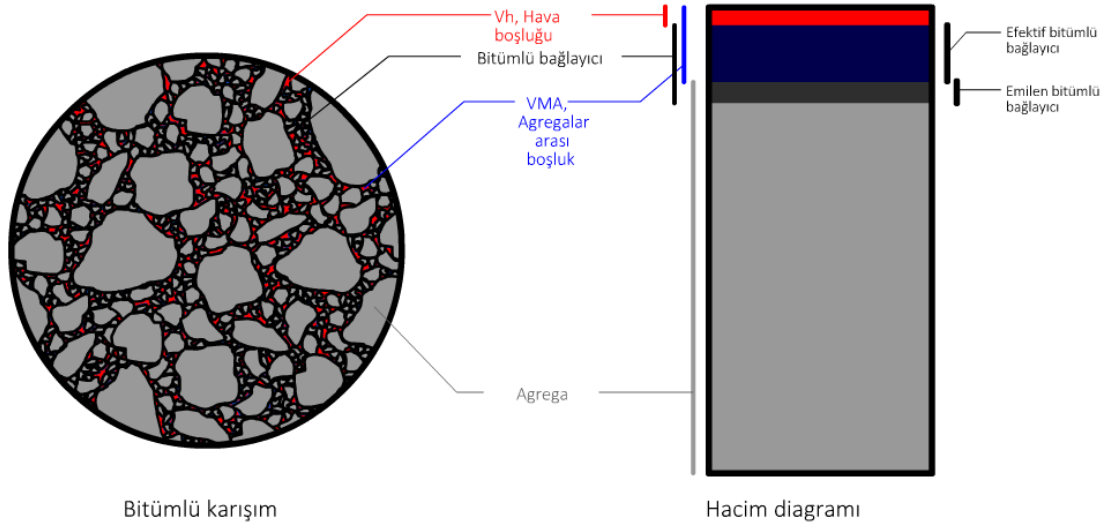
Bitümün  zg l ağırlığı TS EN 15326 standardına göre yapılmıştır. Yapılan deneyde bitümün özgül ağırlığı 1,020 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

7.3 Marshall Tasarım Yöntemi Analizleri

TS EN 3720 standardına göre hesaplanan pratik özgül ağırlık, boşluk, bitümle dolu boşluk, agregalar arası boşluk, stabilite ve akma değerleri, çalışmada karışımlara eklenen %4,0 - %7,0 arasındaki bitüm miktarlarına göre grafikler çizilerek ifade edilmiştir. Agregas, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğu karışımından oluşan briketin agregalar arası boşluk hacimi, toplam briket hacimi içerisindeki agregalar hariç hacimin tamamına karşılık gelmektedir. Başka bir deyiş ile hava boşluğu ve efektif bitümlü bağlayıcı hacimlerinin toplamı agregalar arası boşluğu ifade etmektedir.

Bitüm ile dolu boşluk miktarı ise, briket içerisindeki efektif bitüm haciminin agregalar arası boşluk hacimine oranı olarak ifade edilmektedir. Agregalar arası boşluk hacimine ait görsel şekil 7.2’de verilmiştir.

Grafikler doğal agregas ve c r f agregası için ayrı ayrı çizilmiştir.

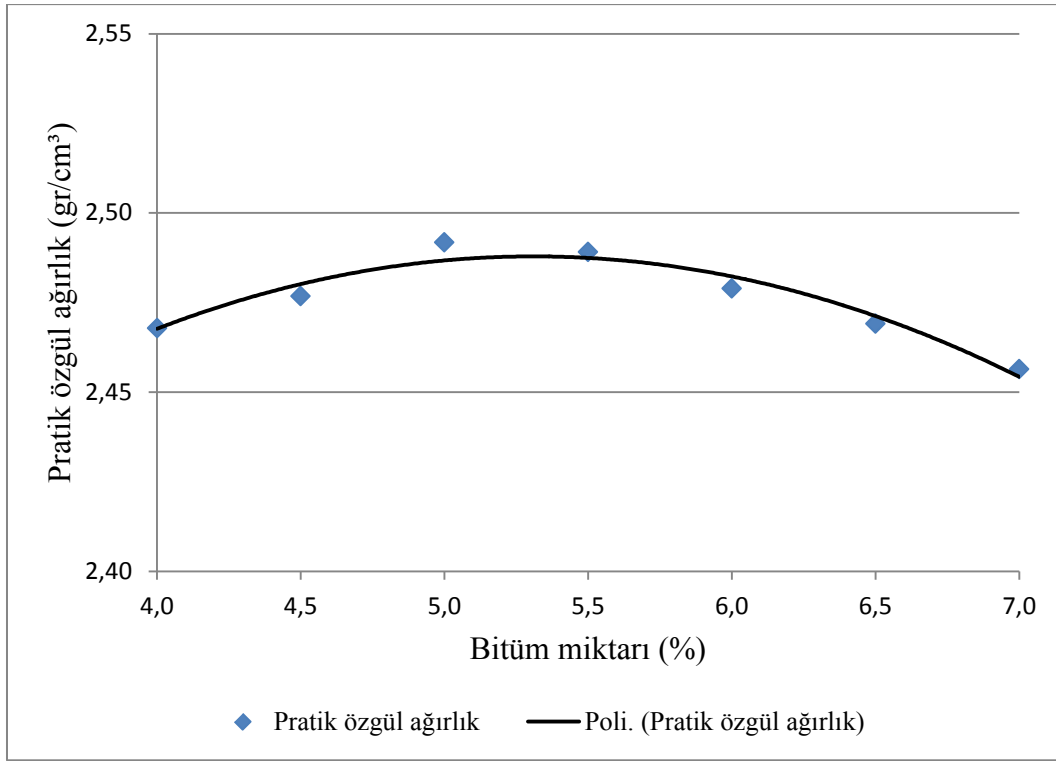


Şekil 7.2: Agregalar arası boşluk değeri şeması.

7.3.1 Sıkıştırılmış bitümlü karışımının pratik özgül ağırlığı

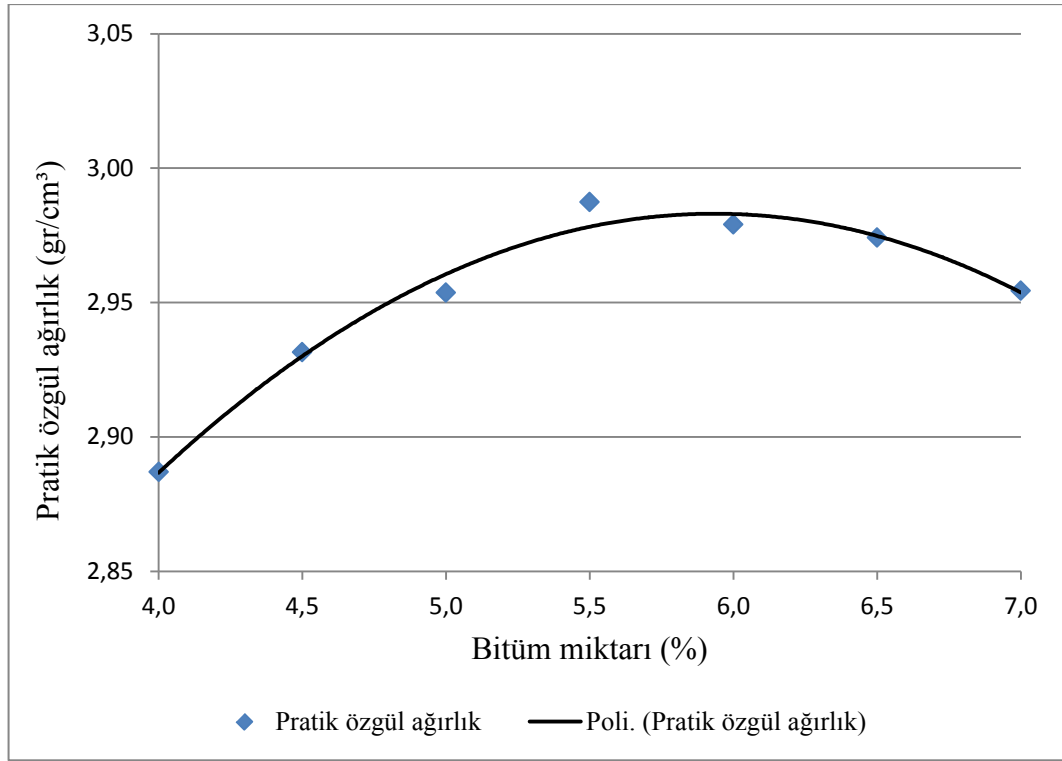
Farklı bitüm miktarları ile hazırlanmış karışımlardan elde edilen sonuçlar ile pratik özgül ağırlık – bitüm miktarı grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde çizilen pratik özgül ağırlık eğrileri ile, karışımın herhangi bir bitüm miktarı yüzdesindeki pratik özgül ağırlığı ve karışımın en yoğun olduğu aralıktaki bitüm miktarı değeri tespit edilebilmektedir. Karışımın en yoğun olduğu değer aralığı, agrega bitüm karışımında bitüm oranının adezyon kuvveti sağlamak için yeterli olduğu ve iyi sıkışabilme özelliği ile karışım içerisindeki hava boşluğunun az olduğu değeri ifade etmektedir.

Doğal agrega ile hazırlanan numuneler için hesaplanan pratik özgül ağırlık değerleri Şekil 7.3’de verilmiştir. Sıkıştırılmış karışımın yoğunluğu, bitüm miktarının %5,2 olduğu değere kadar yükselmekte, bu değerden sonra ise azalmaktadır.



Şekil 7.3: Doğal agregat numunesi pratik özgül ağırlık – bitüm miktarı grafiği.

EAO cürufu ile hazırlanan numuneler ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.4’de verilmiştir. Karışım yoğunluğu, bitüm miktarının %5,2 olduğu değerde maksimum değere ulaşmaktadır. EAO cürufu, 7.1.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini başlığı altında Çizelge 7.5’te tespit edildiği üzere boşluklu yapıda bulunmaktadır ve bitüm miktarının artması ile agregat içerisindeki hava boşlukları bitüm ile dolmaktadır ancak agregaların bitüme doymasından ile pratik özgül ağırlık düşmektedir.



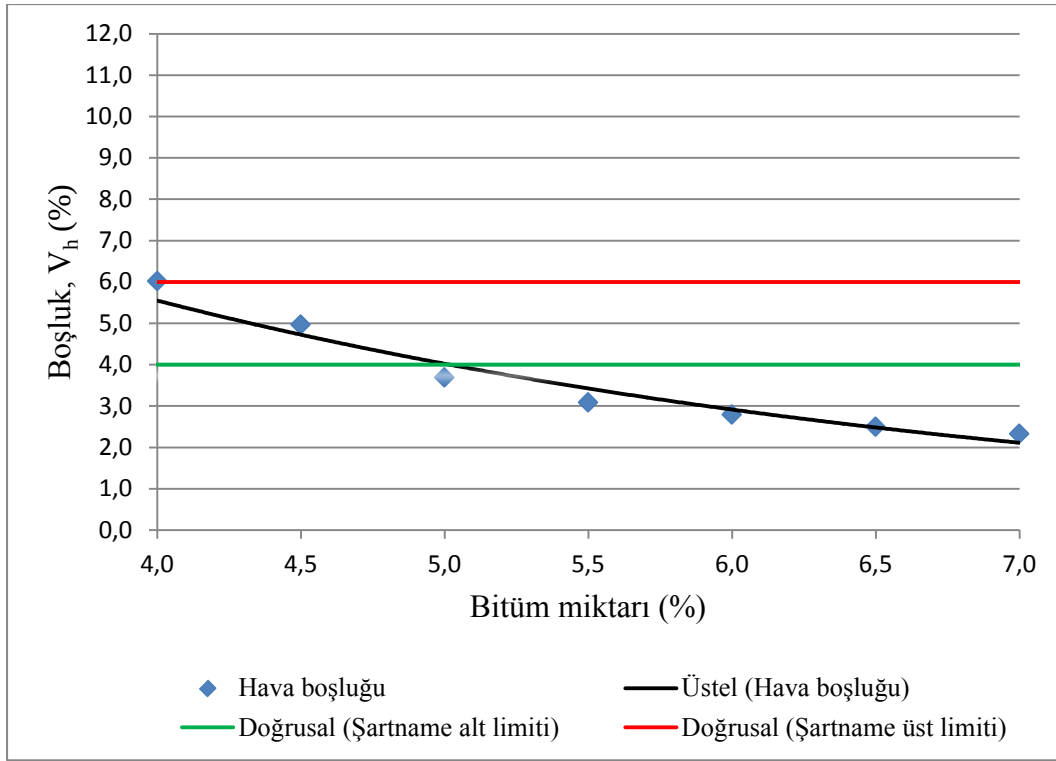
Şekil 7.4: EAO cüruf agregası numunesi pratik özgül ağırlık – bitüm miktarı grafiği.

7.3.2 Sıkıştırılmış bitümlü karışımda hava boşluğu yüzdesinin hesaplanması

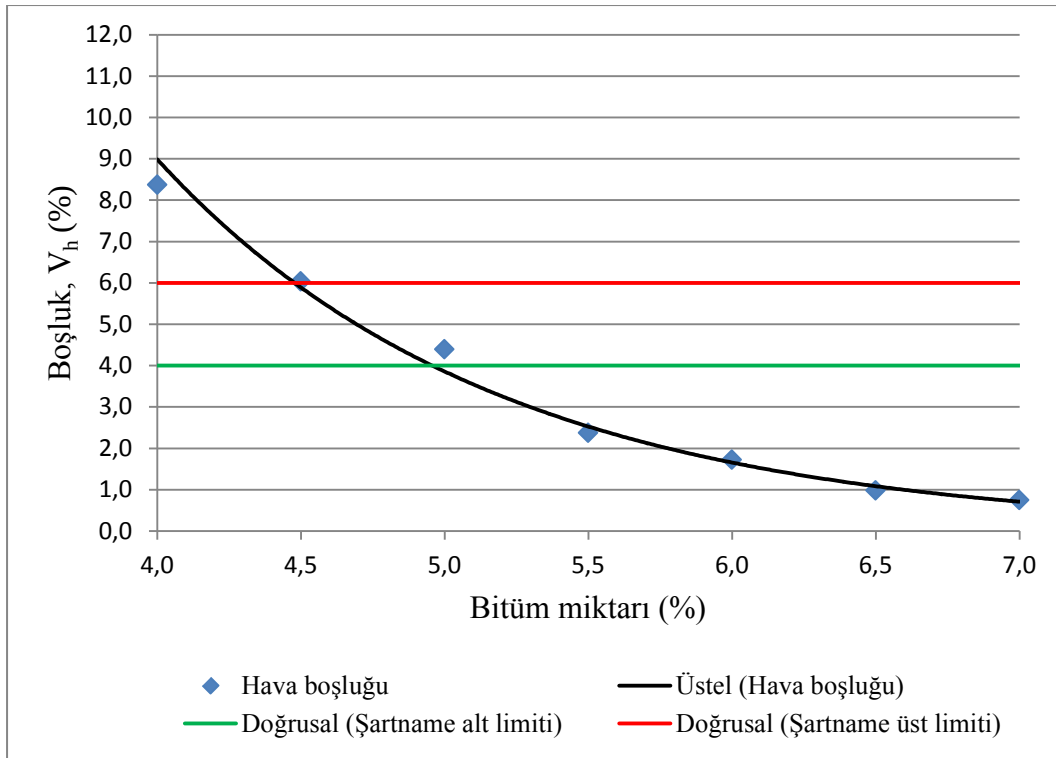
Sıkıştırılmış bitümlü karışımların içerisindeki hava boşlukları, artan bitüm miktarı yüzdesi ile azalmaktadır. Karışıma eklenen bitümün bir kısmı agregalar tarafından emilmektedir ancak karışım içerisindeki bitüm miktarı artması ile agregalar tarafından emilmeyen bitüm, hava boşluklarını doldurmaktadır.

EAO cürufu agregası, doğal agregaya göre daha boşluklu yapıda bulunmaktadır. Bu sebeple karışım içerisindeki toplam hava boşluğu, doğal agregaya ile hazırlanan karışıma göre daha fazladır. Karışıma eklenen bitüm miktarının artması ile bitüm EAO cürufu agregası tarafından emilmekte ve karışım içerisindeki toplam hava boşluğunun azalması, doğal agregaya karışımına göre daha hızlı bir şekilde olmaktadır.

Doğal agregaya ile hazırlanmış numunelere ait hava boşluğu yüzdesi grafiği Şekil 7.5'te, EAO cürufu agregası ile hazırlanmış numunelere ait hava boşluğu yüzdesi grafiği Şekil 7.6'te verilmiştir.



Şekil 7.5: Doğal agrega numunesi boşluk – bitüm miktarı grafiği.



Şekil 7.6: EAO cürufu agregası numunesi boşluk – bitüm miktarı grafiği.

KTŞ 2013’de binder tabakası için karışım içerisindeki boşluk miktarının en az %4, en fazla %6 olması gerektiği belirtilmiştir. Hesaplanan boşluk eğrileri kullanılarak doğal agrega karışımı için tespit edilen şartname sınırları içerisindeki minimum boşluk miktarı şartı bitüm miktarının %3,8’de, maksimum boşluk miktarı şartı ise bitüm miktarının %5,0 olduğu değerde sağlanmaktadır. EAO cürufu agregası ise şartname boşluk alt limit değerini %4,5 bitüm, üst limit değerini %5,0 bitüm miktarları arasında yerine getirmektedir.

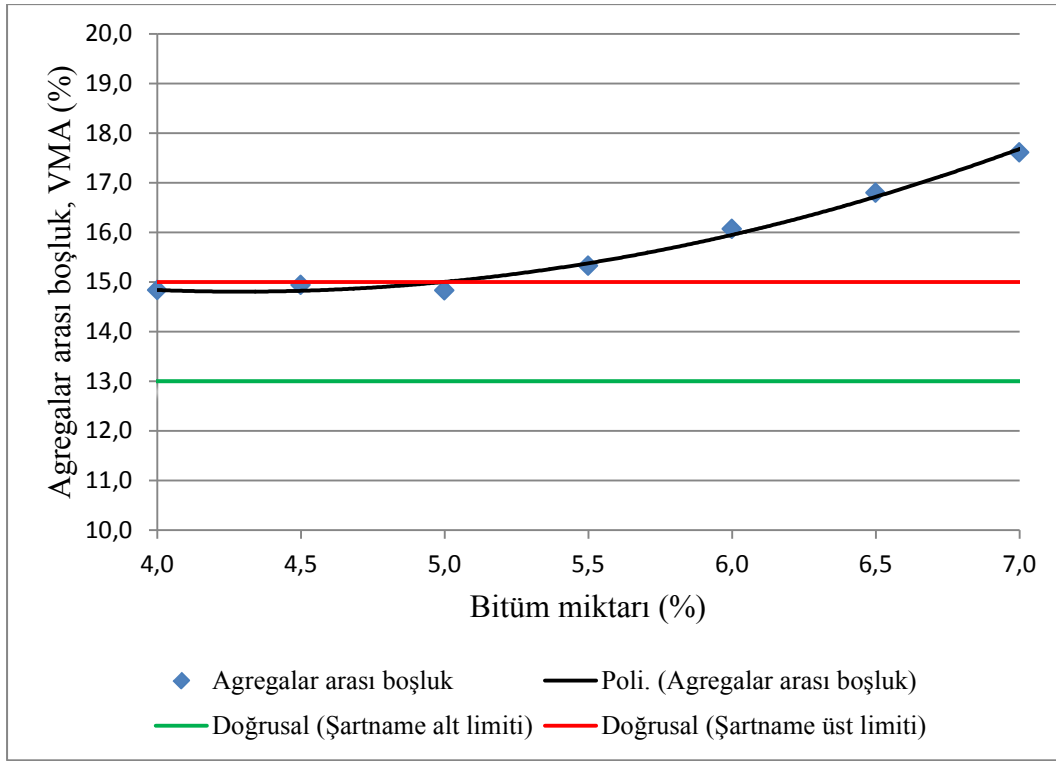
7.3.3 Sıkıştırılmış bitümlü karışımındaki agregalar arası boşluk yüzdesinin hesaplanması

Agregalar arası boşluk, sıkıştırılmış karışımın agrega taneleri arasındaki hava ve efektif bitüm içeren boşlukların toplam miktarının karışım kütleline yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA hesaplanırken agregalar tarafından emilen bitüm, boşluk miktarı olarak değerlendirilmemektedir. KTŞ 2013’de binder tabakası için belirtilen agregalar arası boşluk sınırları en az %13 en fazla %15 olarak belirtilmiştir.

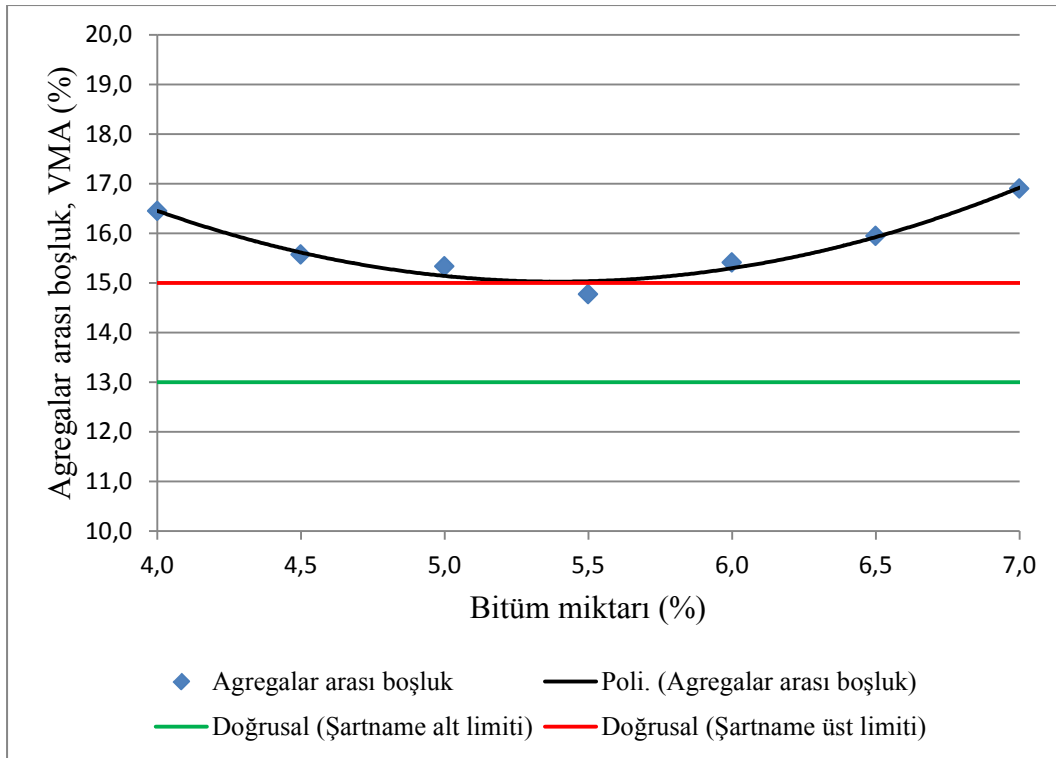
Doğal agrega ile hazırlanan karışımlarda, agregalar arası boşluk değeri bitüm değerlerinin %3,6 ile %5,0 olduğu aralıkta şartnamede belirtilen üst limitin altında kalmaktadır.

EAO cürufu agregası ile hazırlanmış karışımlarda, agregalar arası boşluk değerinin en az olduğu değer şartnamede belirlenen üst limiti ile kesişmektedir ve bu durum karışım bitüm miktarının %5,4 olduğu değerdir. Bitüm miktarının azalması veya artması ile boşluk miktarı artış göstermiştir.

Doğal agrega ile hazırlanmış karışımlar için hava boşluğu – bitüm miktarı grafiği Şekil 7.7’de EAO cürufu agregası ile hazırlanmış karışımlar için hava boşluğu – bitüm miktarı grafiği Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.7: Doğal agrega numunesi agregalar arası boşluk – bitüm miktarı grafiği.



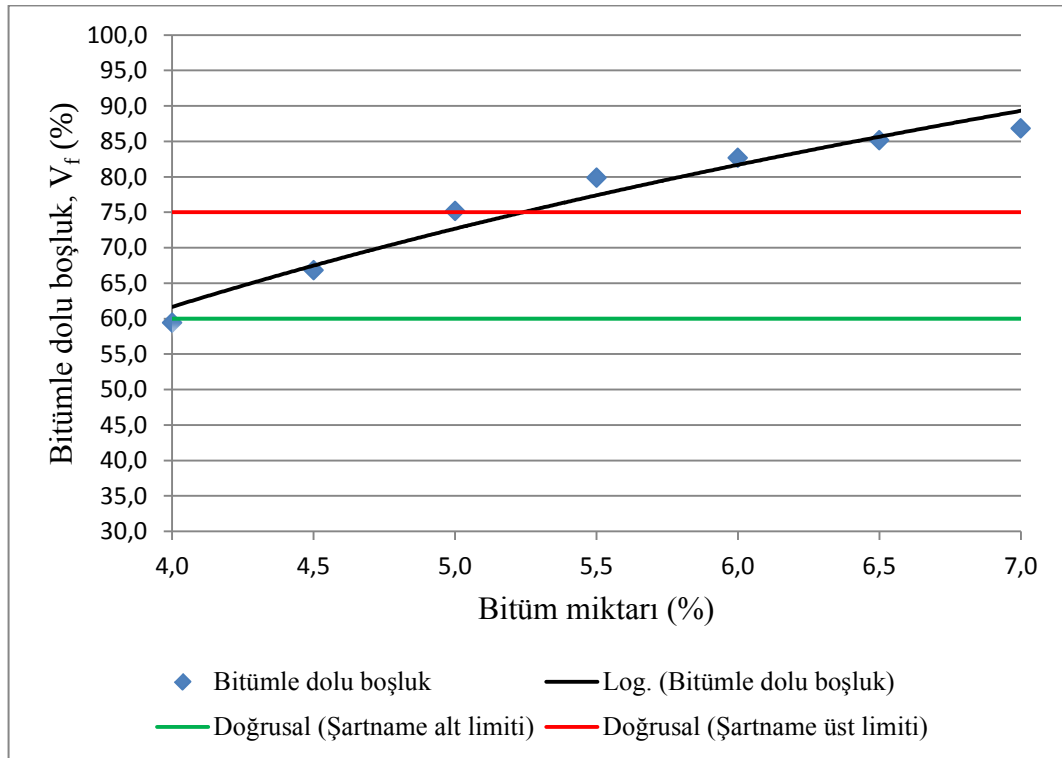
Şekil 7.8: EOA cürufu agregası numunesi hava boşluğu – bitüm miktarı grafiği.

7.3.4 Sıkıştırılmış bitümlü karışımındaki bitümle dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması

Karışım içerisinde bitüm ile dolan agregalar arası boşluk miktarı V_f olarak tanımlanmaktadır ve bitüm ile dolu hacimin, boşluk hacimine oranı olarak yüzde miktarı cinsinden ifade edilmektedir. Karışım içerisine bitüm eklendikçe, bitüm hava boşluklarının yerini almaktadır. Eklenen bitüm, hava boşluklarını doldurarak karışımındaki hava boşluğu miktarını azalmakta ve bitümle dolu boşluk oranını arttırmaktadır.

KTŞ 2013’de binder tabakası için bitüm ile dolu boşluk miktarı sınırı en az %60, en fazla %75 olarak belirtilmiştir. Doğal agregalar karışımı, şartname alt limit değerini bitüm miktarının %3,9 olduğu, üst limit değerinin % 5,2 olduğu miktarda sağlamıştır. EAO cürufu agregası numunesi ise şartname belirtilen alt koşulu %4,4, üst koşulu ise %5,2 bitüm miktarlarında karşılamıştır.

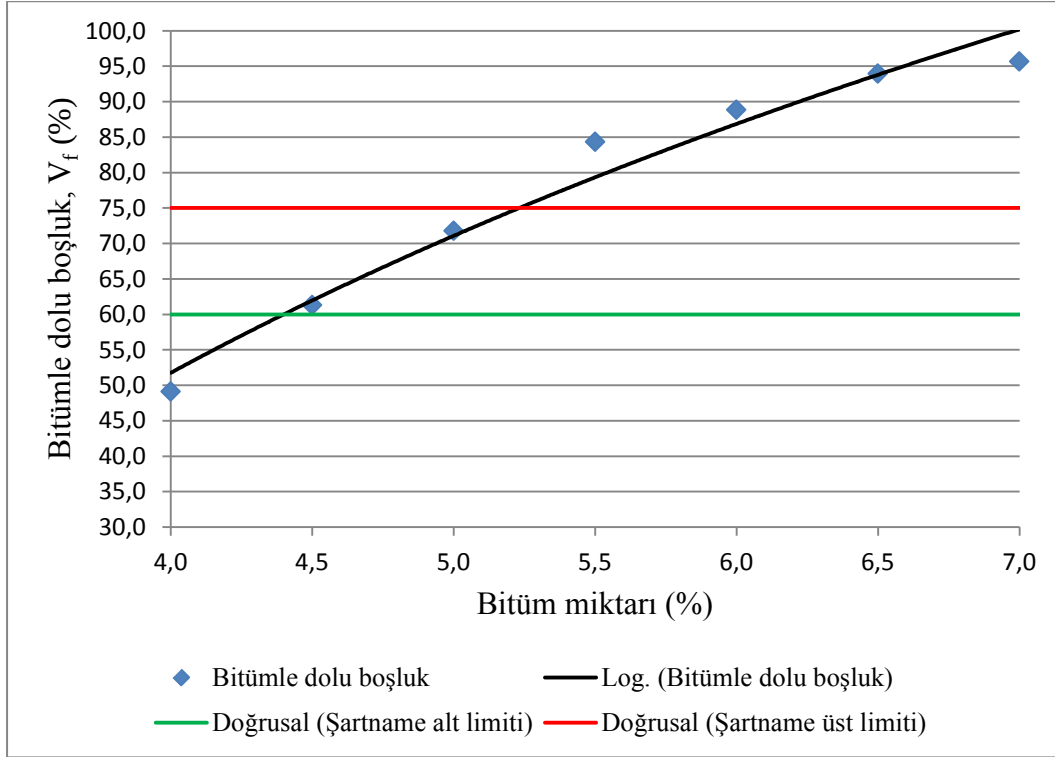
Doğal agregalar numunelerine ait bitümle dolu boşluk grafiği Şekil 7.9’de verilmiştir.



Şekil 7.9: Doğal agregalar numunesi bitümle dolu boşluk – bitüm miktarı grafiği.

EAO cürufu agregası ile yapılan karışımlardaki hava boşluğu yüzdesi, cürufun boşluklu yapısından dolayı doğal agregalar karışımlarına göre daha fazladır. Karışma

eklenen bitüm miktarı ile agregaya yapısındaki hava boşluklarının bitüm ile dolma miktarı, doğal agregaya göre daha yüksek olmakta ve bu nedenle EAO cürufu agregası için çizilen VFA eğrisi, doğal agregaya göre daha düşük yüzdeden başlamaktadır. EAO cürufu agregasına ait bitümle dolu boşluk grafiği Şekil 7.10’da verilmiştir.

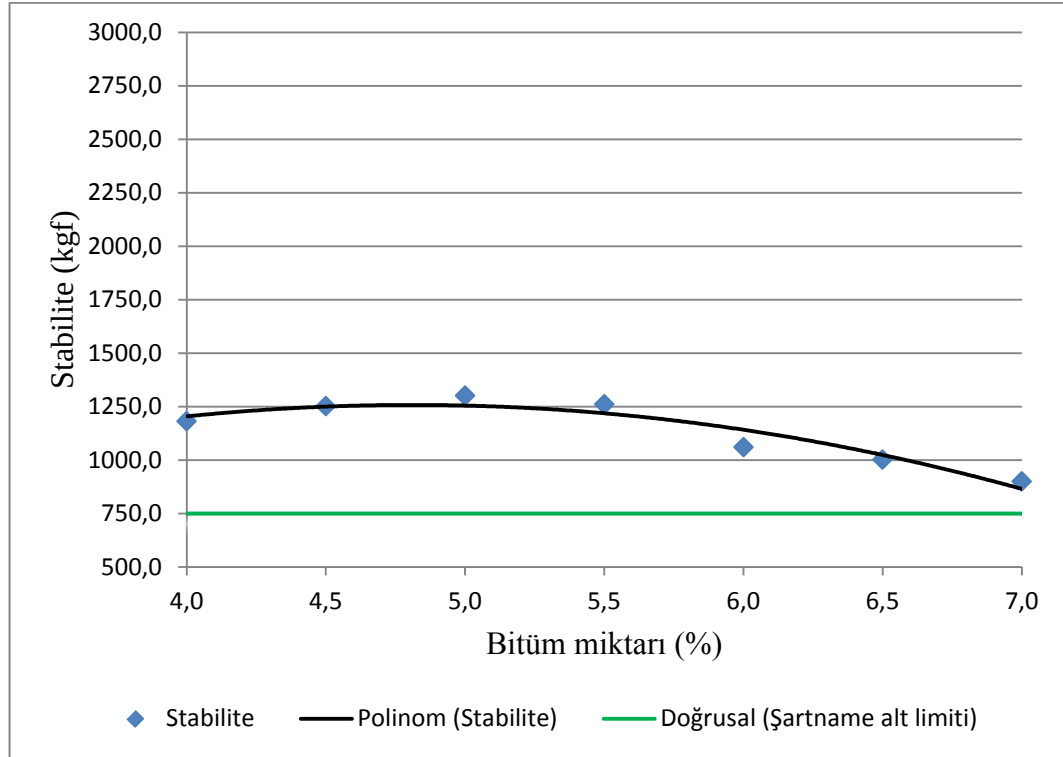


Şekil 7.10: EAO cürufu agregası numunesi bitümle dolu boşluk – bitüm miktarı grafiği.

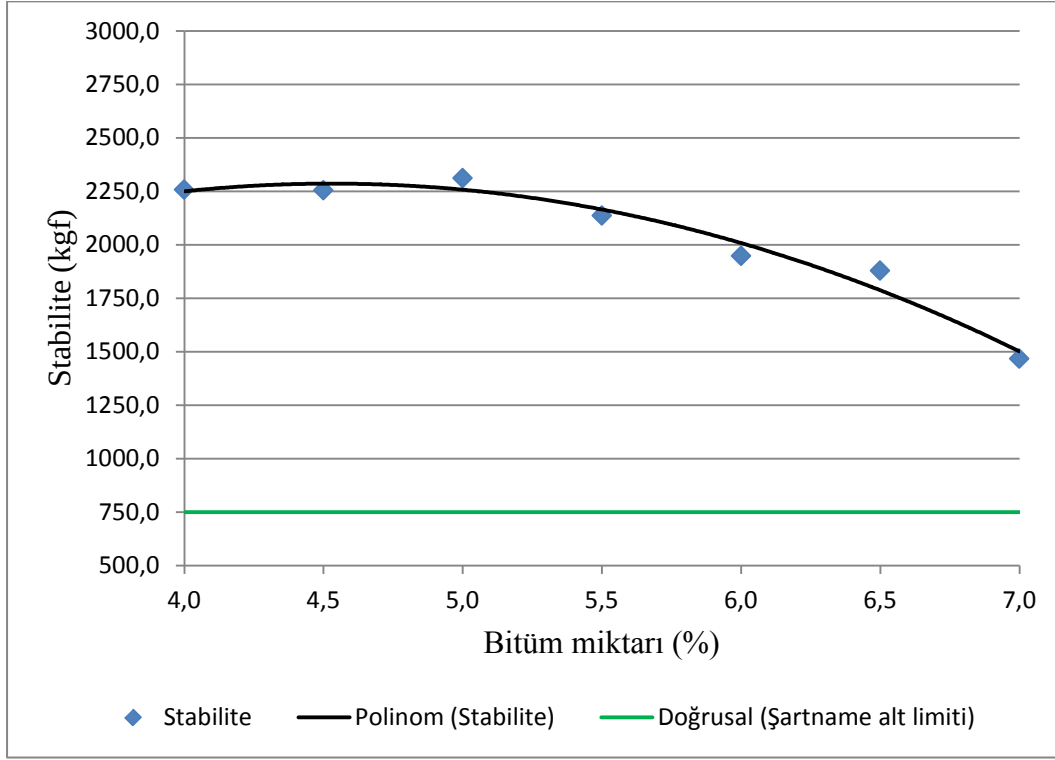
7.3.5 Stabilite

Sıkıştırılmış bitümlü karışımın kırılmaya karşı direnci stabilite olarak tanımlanmaktadır ve numunenin kırılması için gereken yük ile ifade edilmektedir. Karışımın stabilitesi büyük ölçüde kullanılan agreganın dayanımına ve agregaya karışımının kenetlenmesine bağlıdır. EAO cürufu agregası doğal agregaya göre daha pürüzlü olması, daha iyi kenetlenme sağlamaktadır. Bu sebeple elde edilen sonuçlarda EAO cürufu agregası, doğal agregaya göre daha yüksek stabilite değeri vermiştir. Doğal agregaya karışımı en yüksek mukavemeti, bitüm miktarının %4,8 olduğu değerde 1257 kgf olarak göstermiştir. EAO cürufu agregası en yüksek direnci bitüm miktarının %4,5 olduğu değerde 2285 kgf olarak göstermiştir. KTŞ 2013

binder tabakası stabilite değerinin en az 750 kgf olması gerektiği belirtilmiştir. Doğal agregada numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği ve EAO cürufu agregası numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği şekil 7.11 ve şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.11: Doğal agrega numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği.

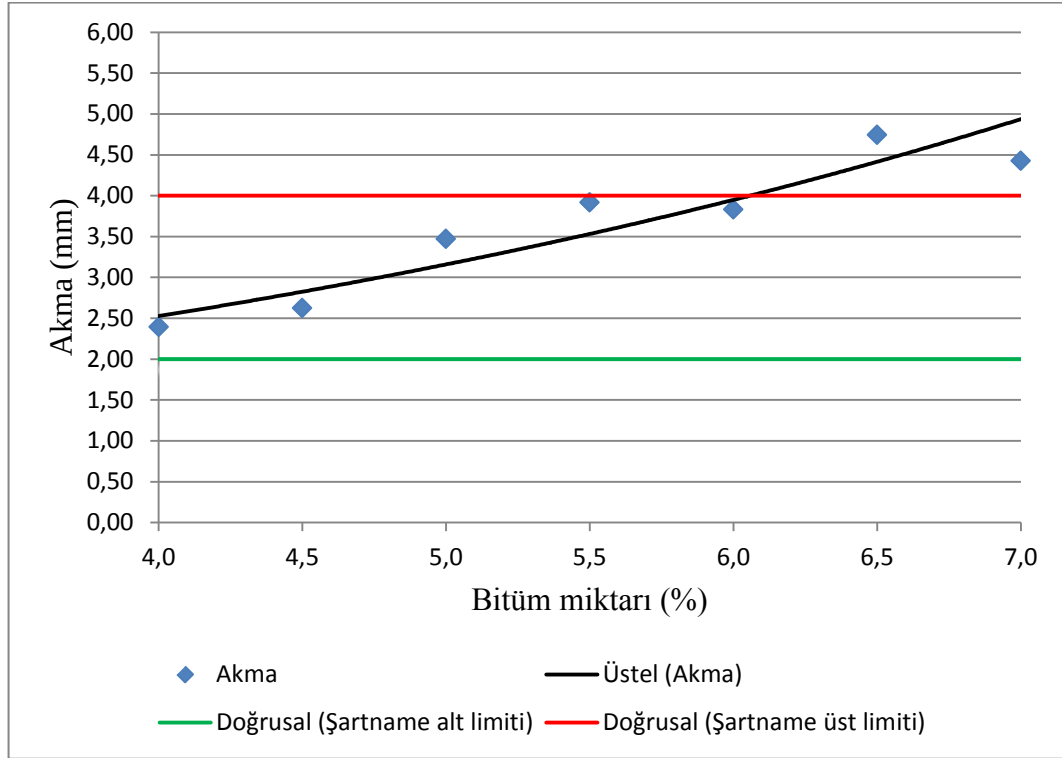


Şekil 7.12: EAO cürufu agregası numunesi stabilite – bitüm miktarı grafiği.

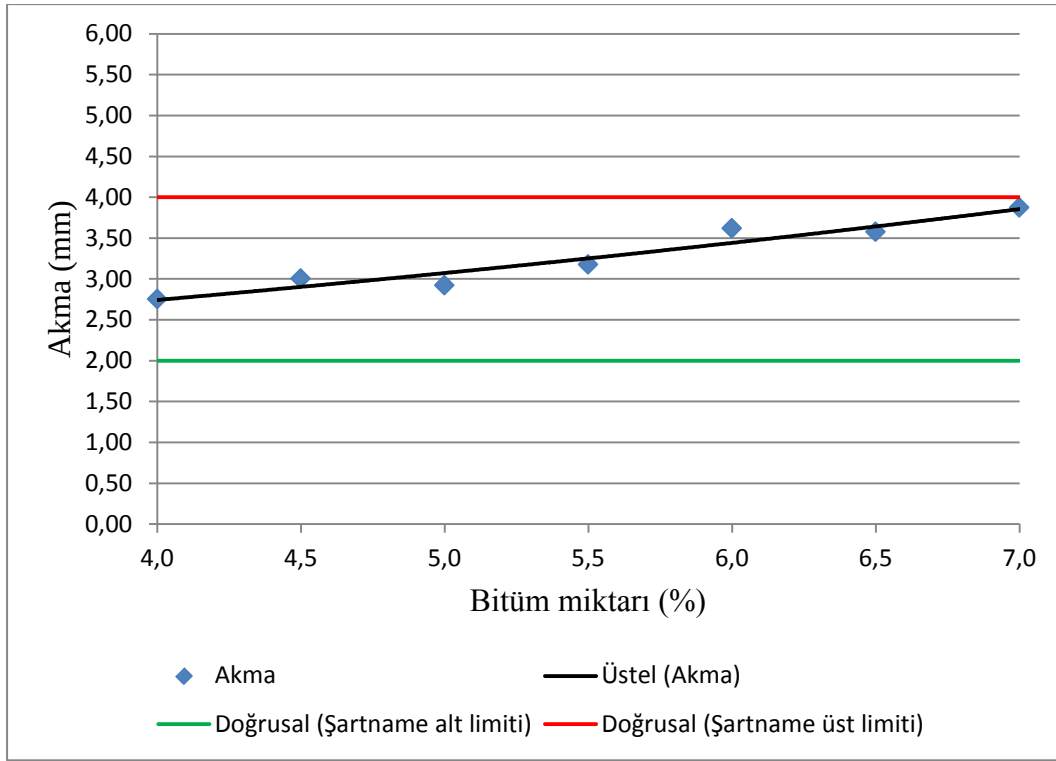
7.3.6 Akma

Akma, kırılma noktasına kadar sıkıştırılmış Marshall numunesindeki deformasyon olarak ölçülmektedir. Akma, karışımın plastiklik ve esneklik özelliklerini belirtmektedir. Karışım içerisindeki bitüm miktarının artması ile karışımın içsel sürtünmesi azalmakta ve plastikliği artmaktadır. EAO cürufu agregaları doğal agregaya göre daha pürüzlü olan yapıları nedeniyle karışım içerisinde oluşturdukları içsel sürtünme kuvveti daha fazladır. Bu sebeple akma miktarındaki değişim, doğal agrega numunelerinden alınan sonuca göre daha az olmaktadır. KTŞ 2013’de binder tabakası akma değeri alt limiti 2 mm, üst limiti 4 mm olarak verilmiştir. Doğal agrega ile hazırlanan karışım şartname üst limit değerini %6,1 bitüm miktarında sağlamaktadır. EAO cürufu agregası ise üst limit değerini %7,3 bitüm miktarında sağlamaktadır.

Doğal agrega numunesi akma – bitüm miktarı grafiği ve EAO cürufu agregası numunesi akma – bitüm miktarı grafiği Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de verilmiştir.



Şekil 7.13: Doğal agrega numunesi akma – bitüm miktarı grafiği.

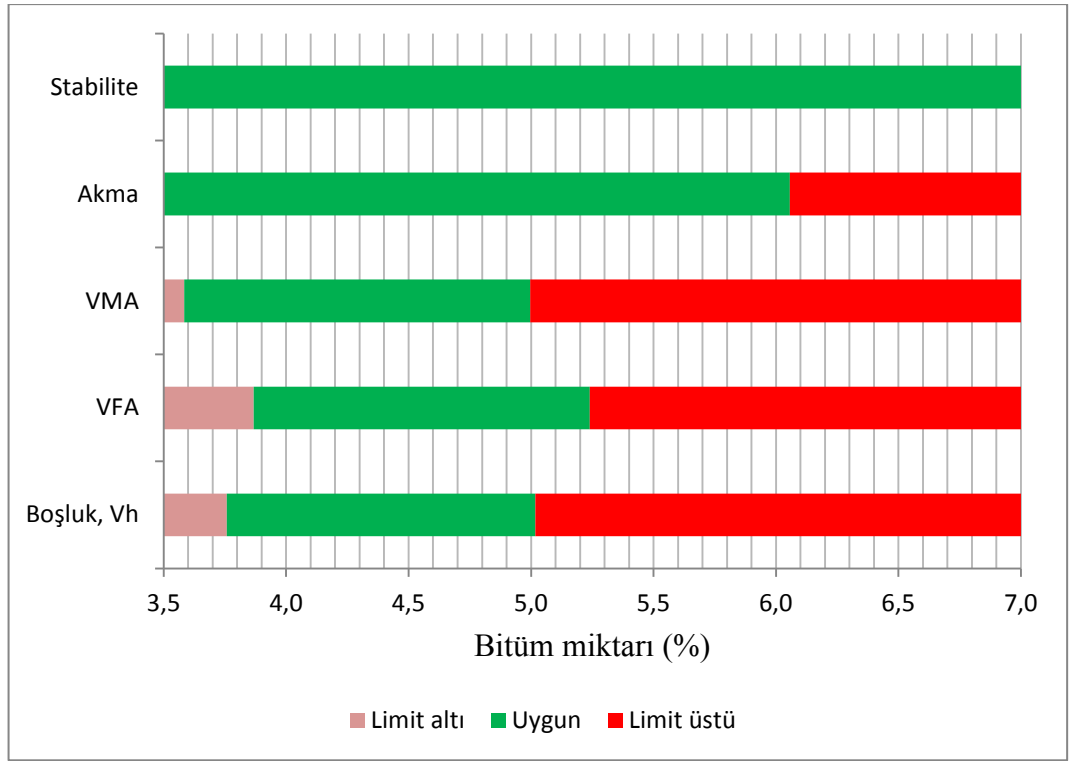


Şekil 7.14: EAO cürufu agregası numunesi akma – bitüm miktarı grafiği.

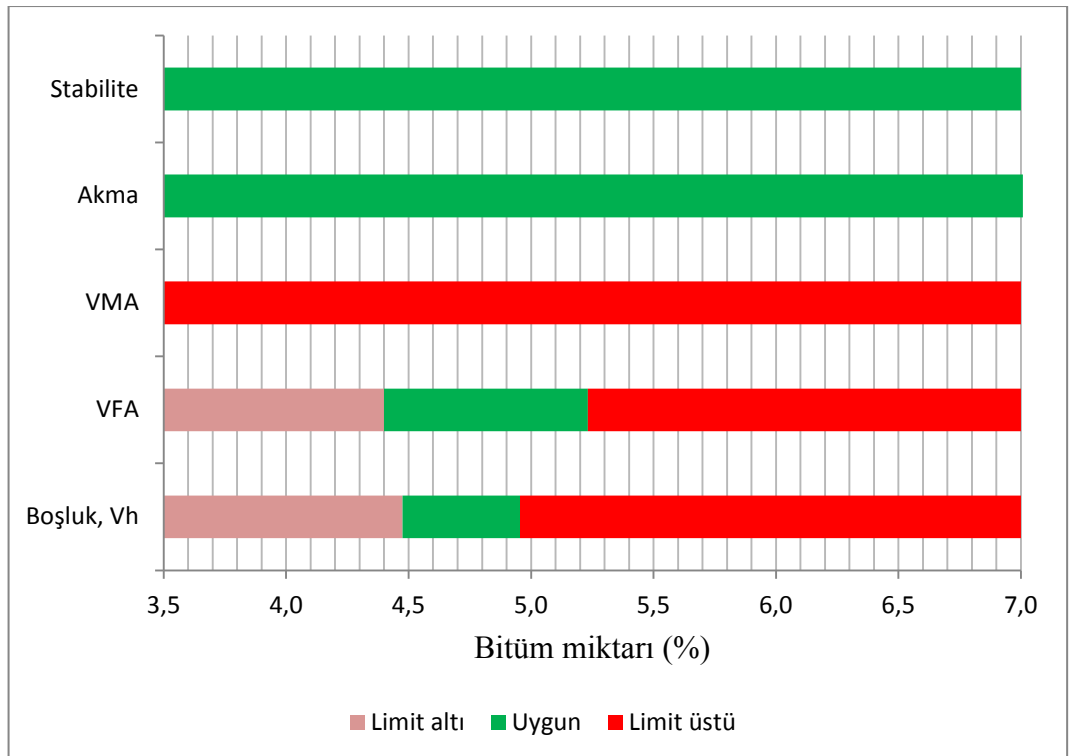
7.4 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi

Optimum bitüm yüzdesi, deneye tabi tutulan karışımlardan elde edilen farklı sonuçlar içerisinde tüm kriterler için en ideal değer belirlenmesidir. Bu çalışmada doğal agrega ve EAO cürufu agregası kullanılan numunelerden, boşluk, agregalar arası boşluk, bitümle dolu boşluk, akma ve stabilite için elde edilen sonuçların bitüm yüzdelere göre değişimi ile şartname alt ve üst limitleri Şekil 7.14 ve Şekil 7.15’de verilmiştir. Tüm kriterleri sağlayan bitüm aralığının alt limit ve üst limit değerleri hesaplanarak, bu değerlerin ortalaması optimum bitüm yüzdesi olarak belirlenebilir.

Bu çalışmada optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi TS 3720’de belirtilen, şartname hava boşluğu sınırlarının ortalamasına karşılık gelen bitüm yüzdesi miktarı olarak seçilmiştir. Bu değerler doğal agrega karışımı için Şekil 7.5 grafiği, EAO cürufu agregası karışımı için Şekil 7.6 grafiği kullanılarak hesaplanmıştır. Sıkıştırılmış karışımların %5 hava boşluğuna göre optimum bitüm miktarları, doğal agrega karışımı için %4,3, EAO cürufu agregası karışımı için %4,7 olarak bulunmuştur.



Şekil 7.14: Doğal agrega numunesi boşluk, stabilite ve akma analizleri.



Şekil 7.15: EAO cürufu agregası numunesi boşluk, stabilite ve akma analizleri.

7.4.1 Optimum bitüm yüzdesi miktarına göre elde edilen sonuçlar

Doğal agregası ile hazırlanan karışım için optimum bitüm yüzdesi olan %4,3'e göre hesaplanan stabilite, bitümle dolu boşluk, agregalar arası boşluk, akma ve pratik özgül ağırlık değerleri Çizelge 7.14'de verilmiştir. Belirlenen optimum bitüm yüzdesinde doğal agregası karışımı şartnamede belirtilen şartları karşılamaktadır.

Çizelge 7.14: Doğal agregası numunesi için %4.3 bitüm miktarına göre sonuçlar.

Özellikler	Deney standardı	Şartname limiti		Optimum bitüm yüzdesi Sonuç
		Min.	Maks.	
Marshall stabilitesi, kgf	TS EN 12697-34	750	-	1238
Boşluk, %	TS EN 12697-8	4	6	5,0
Bitümle dolu boşluk, %	TS EN 12697-8	60	75	65,5
Agregalar arası boşluk, %	TS EN 12697-8	13	15	14,8
Akma, mm	TS EN 12697-34	2	4	2,7
Pratik özgül ağırlık, gr/cm ³				2,48

EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışım için optimum bitüm yüzdesinde hesaplanan stabilite, bitümle dolu boşluk, agregalar arası boşluk, akma ve pratik özgül ağırlık değerleri Çizelge 7.15'de verilmiştir. Belirlenen optimum bitüm yüzdesinde EAO cürufu agregası karışımı şartnamede belirtilen agregalar arası boşluk miktarı sınırını aşmaktadır. Bu, cürufun boşluklu yapısından kaynaklanmaktadır. Karışım için hesaplanan diğer değerler şartnamede belirtilen limitler içerisinde kalmaktadır.

Çizelge 7.15: EAO cürufu agregası numunesi için %4.7 bitüm miktarına göre sonuçlar.

Özellikler	Deney standardı	Şartname limiti		Optimum bitüm yüzdesi Sonuç
		Min.	Maks.	
Marshall stabilitesi, kgf	TS EN 12697-34	750	-	2282
Boşluk, %	TS EN 12697-8	4	6	5,0
Bitümle dolu boşluk, %	TS EN 12697-8	60	75	65,6
Agregalar arası boşluk, %	TS EN 12697-8	13	15	15,4
Akma, mm	TS EN 12697-34	2	4	3,0
Pratik özgül ağırlık, gr/cm ³				2,94

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylelerden elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

- Karışım tasarımında kullanılan doğal agrega ve EAO cürufu, şartnamede belirtilen agregaların fiziksel ve mekaniksel özellikleri koşullarını sağlamıştır.
- Bitümlü sıcak karışım tasarımı Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Doğal agrega ve EAO cürufu agregası kullanılarak yapılan deneylelerden elde edilen karışımların pratik özgül ağırlıkları karşılaştırıldığında, doğal agrega ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlığı 2,45 - 2,50 gr/cm³ arasında iken EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlığı 2,90 ile 3,00 gr/cm³ arasında olduğu tespit edilmiştir.
- EAO cürufu agregası ve doğal agrega ile hazırlanan sıkıştırılmış karışımlarda, eklenen bitüm miktarına bağlı boşluk oranı (V_h) değişimleri karşılaştırıldığında (Şekil 7.4, Şekil 7.5) EAO cürufu agregası ile hazırlanmış karışımda gözlemlenen değişim, doğal agrega ile hazırlanmış karışıma göre daha dar aralıkta meydana gelmektedir. EAO cürufu agregası numunelerine ait boşluk miktarında gözlemlenen bu hızlı değişim karışıma eklenen bitüm miktarının %4 ile %6 olduğu aralıkta gözlenmiştir.
- Farklı bitüm miktarları ile hazırlanan Marshall numuneleri içerisindeki bitümle dolu boşluk miktarı (V_f), karışıma eklenen bitüm miktarının artması ile artmaktadır. EAO cürufu agregası ile hazırlanmış karışımların eklenen bitüm miktarına bağlı olarak boşluk oranları (V_h), doğal agrega ile hazırlanan karışımlara göre daha hızlı azalmaktadır. Bitüm ile dolu boşluk oranı ise karışımın sıkışma oranının artmasıyla azalan boşlukların bitüm ile dolması nedeniyle artmaktadır.

- Agregalar arası boşluk (VMA) EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımlarda, doğal agrega ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek miktarda olmaktadır. Bu fark, farklı yüzey yapılarında olan, dolayısıyla farklı içsel sürtünme kuvvetlerine sahip, karışımların aynı enerji ile sıkıştırılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Agregalar arası boşluk miktarının fazla olması karışımın stabilitesini olumsuz yönde etkileyen bir etken olmaktadır. Karışım içerisindeki agregalar arası boşluk miktarının azaltılması karışımı oluşturan gradasyon limitlerinde yapılacak değişim ile veya karışımın sıkıştırılmasında uygulanacak enerjinin artırılması ile elde edilebilir. Ancak bu değişikliklerin etkileri ayrıca incelenmelidir.
- EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımlarda akma miktarı, doğal agrega ile hazırlanan karışımlarda ölçülen akma değerlerden daha düşük olmuştur. Bu, cürufun pürüzlü yapısı nedeniyle karışımın içsel sürtünme kuvvetinin yüksek olması sonucu ortaya çıkmıştır. Her iki tür karışımda meydana gelen akma miktarları, karışımların içerisine eklenen bitüm miktarının artması ile karışımların kohezyon kuvveti azalmış ve akma değeri yükselmiştir. Akma değerinin yüksek olması, kaplamanın dayanımını düşürmekte ve yük altında deforme olmasına neden olmaktadır.
- EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımlarda elde edilen stabilite değeri, doğal agrega ile hazırlanan karışımlarda elde edilen değerlerden yüksek olmuştur. Stabilite değeri, aynı bitümlü bağlayıcı kullanılan fakat farklı tür malzemelerden oluşan karışımlarda agrega tanelerinin kenetlenme durumu ile farklılık göstermektedir. EAO cürufunun pürüzlü yapısı nedeniyle agrega tanelerinin kenetlenmesi, doğal agrega tanelerinin kenetlenmesine göre daha etkili olmaktadır. Her iki agrega türü ile hazırlanmış karışımdan elde edilen stabilite değerleri, karışımlara eklenen bitüm miktarının artması ile azalmıştır.
- Marshall Tasatım Yöntemi ile yapılan karışım tasarımında optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi, deneylerden elde edilen sonuçlar ile çizilen boşluk yüzdesi-bitüm miktarı grafiğinin kullanılarak şartnamede belirlenen boşluk aralığının orta noktasına karşılık gelen karışımdaki bitüm miktarının tespiti şeklinde yapılmıştır. Doğal agrega numunesi ile hazırlanan karışımın

optimum bitüm miktarı %4,3, EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımın optimum bitüm miktarı %4,7 olarak tespit edilmiştir.

- Optimum bitüm yüzdesine göre hesaplanmış sonuçlarda EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımın stabilite değeri 2282 kgf, doğal agregası ile hazırlanan karışımın stabilite değeri 1238 kgf olarak bulunmuştur. Her iki karışım da şartnamede belirtilen alt sınır 750 kgf değerinin üzerindedir.
- Bitümle dolu boşluk miktarı EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımında %65,6, doğal agregası ile hazırlanan karışımında ise %65,5 olarak tespit edilmiştir. Her iki karışımında benzer değerlerde sonuç vermiş ve şartnamede belirtilmiş olan bitümle dolu boşluk limitleri olan %60 ile %75 değerleri arasında kalmıştır.
- Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de agregalar arası boşluk değeri için alt limit %13, üst limit %15 olarak belirtilmiştir. Doğal agregası ile hazırlanmış karışımın agregalar arası boşluk miktarı %14,8 olarak hesaplanmış ve şartname koşulunu sağladığı görülmüştür. EAO cürufu agregası ile hazırlanmış karışımın agregalar arası boşluk miktarı ise %15,4 olarak hesaplanmıştır. Bu değer şartname koşulunu sağlayamamaktadır. Ancak agregalar arası boşluk miktarı ile tekerlek izi oluşumu şeklinde meydana gelen deformasyonlar ilişkilendirilmektedir. Doğal agregası yapısına göre tasarlanmış Marshall Tasarım Yöntemi’nde agregalar arası boşluk miktarının artması ile agregası kenetlenmesinin azalacağı ve stabilitenin düşeceği öngörülmektedir. EAO cürufu agregasının ise çok pürüzlü yapısı nedeniyle doğal agregaya göre daha az yüzey alanı teması ile daha yüksek stabilite değerine ulaştığı tespit edilmiştir.
- Akma değeri doğal agregası ile hazırlanan karışımında 2,7 mm, EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımında 3,0 mm hesaplanmıştır. Her iki karışım da şartnamede belirtilen alt limit 2,0 mm değerinin üzerinde ve üst limit 4,0 mm değerinin altında kalarak gerekli koşulları sağlamıştır.

- Pratik özgül ağırlık değeri doğal agrega kullanılarak hazırlanan karışım için $2,48 \text{ gr/cm}^3$, EAO cürufu agregası kullanılarak hazırlanan karışım için $2,94 \text{ gr/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda EAO cürufunun, doğal agrega için Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de belirlenen tüm kriterleri sağladığı görülmüştür. EAO cürufunun yapay agrega olarak karayolu esnek üstyapı binder tabakasında kullanımı şartnamede belirlenen kriterler dahilinde büyük ölçüde uygunluk göstermektedir. Ancak şartnamede asfalt betonu dizayn kriterleri ile ilgili olan agregalar arası boşluk değeri, belirtilen üst limit koşulunu aşmıştır.

EAO cürufunun karayolu üstyapısında kullanımı ile ilgili bazı öneriler aşağıda sunulmuştur.

- EAO cürufunun verdiği sürtünme katsayısı değerinin ve buna bağlı olarak oluşturduğu sürtünme kuvvetinin yüksek olması, sürüş güvenliğini artırıcı bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca agreganın cilalanma süresinin doğal agregaya göre daha uzun olması ile kaplamanın hizmet süresine olumlu etkisi olacağı düşünülebilir.
- Karışımın akmaya karşı dirençli olması, tekerlek izi oluşumu gibi kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Ağır taşıt trafiğinin yüksek olduğu bölgelerde EAO cürufu kullanımı tekerlek izi oluşumunun engellenmesi için bir seçenek olarak önerilmektedir.
- EAO cürufu ile tasarlanan binder tabakasının yüksek stabilite değerine ve düşük akma miktarına sahip olması, aşınma tabakasından iletilen trafik yüklerini temel tabakası üzerinde daha geniş alana dağıtılmasını sağlamaktadır. Bu sayede temel ve alttemel tabakalarına düşen gerilimin azalması ile bu katmanların tabaka kalınlıkları gereksinimlerinin değişebileceği dikkate alınmalıdır.
- Marshall tasarım yöntemi uygulanarak EAO cürufunun kullanıldığı numunelerden elde edilen grafiklerde, boşluk (V_h), agregalar arası boşluk (VMA) ve bitümle dolu boşluk (V_f) değerlerinin doğal agrega için elde edilen

değerlere göre daha hızlı değişim gösterdiği saptanmıştır. Bu nedenle karışımın plantlerde hazırlanması sırasında üretimdeki hata toleransına dikkat edilmesi önerilmektedir.

- EAO cürufu ile hazırlanan bitümlü karışımın özgül ağırlığı, doğal agregaya ile hazırlanan karışımın özgül ağırlığından yaklaşık %20 daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle EAO cürufu kullanılarak üretilen bitümlü sıcak karışımın asfalt plenti ile inşaat sahası arasındaki nakliye maliyetinin artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

EAO cürufunun Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlaması, bu malzemenin karayolu esnek tip üstyapıda yapay agregaya olarak değerlendirilmesi imkanını sunmuştur. Bu sayede, taş ocaklarından elde edilen doğal agregaya verilen ağırlığın azaltılması öngörülmektedir. Doğal agregaya kaynağına olan ihtiyacın azalması ile doğal yaşam alanı içinde kalan kaynakların kullanılmaması dolayısıyla çevreye verilen tahribatın azaltılması ve doğal yaşamın korunması sağlanabilir. Doğal agreganın elde edilmesi için taş ocaklarında harcanan enerjiden tasarruf edilerek, atık durumdaki EAO cüruflarının değerlendirilmesi ile bu malzeme ekonomiye geri kazandırılabilir.

Her yıl artan üretim ile ortaya çıkan cüruf miktarı artmakta ve kullanılmadan depolanmaktadır. Sürekli artan depolanmış malzeme yığını çevreye zarar vermektedir. EAO cürufu kullanımı yasal düzenlemelerle yaygınlaştırılmalı ve depolanmış malzemenin ekonomiye kazandırılması teşvik edilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **TechnoBee ve İTÜ Malzeme UYGAR Merkez Müdürlüğü**, (2012). *Elektrik Ark Fırınlı Çelik Tesislerinde Üretilen Çelik Cürufunun Dolgu, Temel ve Alttemel Olarak Kullanımına İlişkin Teknik Rapor*.
- [2] **Candemir, B., Beyhan, B. ve Karaata, S.**, (2012). *İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik*. TÜSİAD, ISBN: 978-9944-405-88-1, Türkiye.
- [3] **Özcan, A.**, (2014). *Karayollarının Mevcut Durumu ve Gelecekteki durumuna Asfalt Sektörünün Bakışı*. 3. Karayolu Ulusal Kongresi, Ankara.
- [4] **Umar, F. ve Yayla, N.**, (1994). *Yol İnşaatı*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [5] **Varol, T.**, (2004). *Bartın Yöresi Orman Yollarının Üstyapı Kalınlığının ve Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi* (Doktora tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- [6] **Fındık, F. S. ve Saltan M.**, (t.y.). *Hafif Agregaların Esnek Üstyapı Alttemelinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- [7] **Tunç, A.**, (2007)., *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [8] **Yeğinoğlu, A.**, (2009). *Niçin Beton Yol?*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [9] **Ağar, E., Sutas, İ. ve Öztaş, G.**, (1998). *Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları)*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [10] **Ecevit, O.** (2007). *Karayollarında Rijit Üstyapı Uygulamaları ve Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, İstanbul.
- [11] **Khazanovich, L., Lederle, R., Tompkins, D., Harvey ve Signore, J.**, (t.y.). *Guidelines for the Rehabilitation of Concrete Pavements Using Asphalt Overlays*, University of Minnesota, University of California, USA.
- [12] **Karayolları Genel Müdürlüğü**, (2014). *Karayolları Ulaşım İstatistikleri (2013)*. Alındığı tarih: 05.03.2015. Adres: www.kgm.gov.tr
- [13] [Esnek üstyapı katmanları görseli] Alındığı tarih: 21.02.2015 Adres: www.eurobitume.eu/bitumen/applications/roads
- [14] **Göktepe, A. B., Altun, S. ve Lav, A. H.**, (t.y.) *Esnek Üstyapılarda Taban Zemini Dinamik Davranışının Geosentetiklerle İyileştirilmesi*.

- [15] **Özdemir, A. ve Özdemir, M.**, (t.y.). *Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Uygulanan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri*. Sondaj Dünyası Sayı:3.
- [16] **Umar, F. ve Ağar, E.**, (1985). *Yol Üstyapısı*. İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [17] **Kuloğlu, N., Kök, B. V. ve Durmaz, B.**, (2006). *Beton Asfaltın Farklı Türden Temeller Üzerindeki Serbest Basınç Mukavemet Değerinin Değişimi*. Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [18] **Li, P. ve Liu, J.**, (2010). *Characterization of Asphalt Treated Base Course Material*. University of Alaska, Fairbanks.
- [19] **Kök, B. V. ve Kuloğlu, N.**, (2008). İki Aşamalı Karıştırma Yönteminin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [20] **National Asphalt Pavement Association and Federal Highways Administration**, (2001). *HMA Pavement Mix Type Selection Guide*.
- [21] **Lavin, P.**, (2003). *Asphalt Pavements: A Practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects*. CRC Press
- [22] **Morova1, N., Serin, S. ve Terzi, S.**, (2011). Bitüm Miktarının Asfalt Betonu Dayanımına Etkisinin Bulanık Mantık Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ.
- [23] **Özay, O.**, (2011). *Farklı Modifiye Katkılarla Hazırlanan Poroz Asfalt Karışımların Performansının İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [24] **Alataş, T., Ahmedzade, P. ve Doğan, Y.**, (2005). *Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregaların Kaplamanın Fiziksel Özelliklerine Etkisi*. Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [25] **T.C. Milli Eğitim Bakanlığı**, (2012). Kimya Teknolojisi Ham Petrolün Destilasyonu. Ankara.
- [26] **Krishan, J. M.**, (2006). *The Physical and Chemical Structure of Asphalt: With a Brief History of Theri Usage and Availability*. Indian Institute of Technology Madras, Hindistan.
- [27] **Read, J. Ve Whiteoak, D.**, (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford Publishing, İngiltere.
- [28] **Whiteoak, D.**, (2004). *Shell Bitüm El Kitabı*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret AŞ, Türkiye.
- [29] **Sağlık, A., Orhan F. ve Güngör, A. G.**, (2012). BSK Kaplamalı yollar için Bitüm sınıfı Seçim Haritaları. T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [30] **TS EN 12591**, (2011). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Kaplama sınıfı bitümler-Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [31] **Yavuz, A.**, (2002). *Asfalt El Kitabı*. Yazıevi İletişim Hizmetleri, İstanbul.

- [32] **Uçar, H.**, (2008). *Kırmataşların Beton Agregasında ve Hazır Beton Tesislerinde Kullanılma Kriterleri* (Yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [33] **Karayolları Teknik Şartnamesi**, (2013). KGM Yayını, Ankara.
- [34] **Nicholls, J. C.**, (1998). *Asphalt Surfacing*. Londra: E& FN Spon. ISBN:0-419-23110-2.
- [35] **Eurohorizons Danışmanlık**, (2012). *Avrupa Birliğine Uyum Sürecinde Sektör Rehberleri Demir-Çelik Sanayii*. İstanbul Sanayi Odası Yayınları, İstanbul.
- [36] **T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı**, (2014). *Hatay Osmaniye Kahramanmaraş Demir-Çelik Sektör Raporu*.
- [37] **Worldsteel Association**, (2014). *World Steel in Figures 2014*. Alındığı tarih: 11.03.2015. Adres: www.worldsteel.org
- [38] **Worldsteel Association**, (2014). *Steel Statistical Yearbook 2014*. Alındığı tarih:11.03.2015. Adres: www.worldsteel.org
- [39] **Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği**, (2012). *Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu 2011*. ISBN: 978-605-137-123-8, Ankara.
- [40] **T. C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı**, (2013). *Demir Çelik Sektörü Raporu*. Sanayi Genel Müdürlüğü.
- [41] **Devlet Planlama Teşkilatı**, (2001). *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. ISBN: 975-19-2864-8, Ankara.
- [42] **Özdabak, A.**, (2004). *Demir Çelik ve Enerji*. Rengin Basımevi, İstanbul.
- [43] [Entegre ve ark ocaklı demir çelik tesislerinde üretim akışı görseli] Alındığı tarih: 17.02.2015 Adres: www.ushamartin.com
- [44] **Yeğen, H.**, (2012). *Demir-Çelik Metalurjisi* (Ders Notları). Bülent Ecevit Üniversitesi, Elazığ.
- [45] **Alsaran, A.**, (t.y.). *Pik Demir Üretimi* (Ders notu). Kafkas Üniversitesi, Kars.
- [46] **T. C. Milli Eğitim Bakanlığı**, (2006). *Makine Teknolojisi. Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi*, Ankara.
- [47] **T. C. Kalkınma Bakanlığı**, (2014). *Demir-Çelik Çalışma Grubu Raporu*. ISBN: 978-605-4667-64-2, Ankara.
- [48] **Bilen, M.**, (2010). *Çelikhane Cürufılarından Liç-Karbonatlaştırma Prosesi ile Kalsiyum Karbonat Kazanılması* (Yükseklisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [49] [Üstten üflemleri bazik oksijen fırını görseli] Alındığı tarih: 21.02.2015. Adres: chemwiki.ucdavis.edu
- [50] **T. C. Milli Eğitim Bakanlığı**, (2011). *Metalürji Teknolojisi Sıvı Çelik Üretimi*. Ankara.

- [51] **Felekoğlu, B.**, (2014). *Alternatif Yapı Malzemeleri Yapılarda Çelik Kullanımı* (Ders notu). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [52] [Bazik oksijen fırını görseli] Alındığı tarih: 21.02.2015. Adres: www.industry.siemens.com/
- [53] [Elektrik ark ocağı elektrotları görseli] Alındığı tarih 23.02.2015 Adres: www.cvs.com.tr
- [54] **Özgür, M.**, (2013). *Metal Sektöründe Risk Analizi Uygulaması*. T. C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İzmir.
- [55] [EAO işlem sırası görseli] Alındığı tarih: 25.02.2015 Adres: www.olifer.com/en/steelmaking.php
- [56] **Erdoğan, T. Y.**, (t.y.). *Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı*. ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- [57] **Öcal, Y.**, (2014). *Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi* (Uzmanlık tezi). T.C. Kalkınma Bakanlığı, ISBN: 978-605-9041-06-5.
- [58] [Demir cürufu görseli] Alındığı tarih: 01.03.2015 Adres: www.kaptandemir.com.tr
- [59] **Engin, Y.**, (2015). *Yüksek Fırın Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Çimento*.
- [60] **Tokyay, M. ve Erdoğan, K.** (2009). *Cüruflar ve Cürufu Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [61] **Lewls, D. W.**, (1981). *History of Slag Cements*. National Slag Association, ABD.
- [62] **U. S. Department of Transportation**, (2012). *Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavementns*. Report No: FHWA-HIF-12-008.
- [63] **Huang, L. S. ve Lin, D. F.**, (2011). *Influence of Cooling Efficiency of Basic Oxygen Furnace Slag Used in Recycled Asphalt Mixtures*. International Journal of Pavement Research and Technology.
- [64] [BOF işlem adımları görseli] Alındığı tarih: 11.01.2015. Adres: www.steelconstruction.info/
- [65] **Bilgiç, M.**, (t.y.). *Elektrik Ark Ocaklarında Karbon Enjeksiyonu, Cüruf ve Refrakter İlişkileri*. KÜMAŞ Kütahya Manyezit İşletmeleri A.Ş., Kütahya.
- [66] **Apfel, J.**, (t.y.). *Electric Arc Furnace Slag – a product not waste*. Badische Stahl Engineering, ABD.
- [67] [EAO'ndan sıvı çeliğin alınması görseli] Alındığı tarih: 17.01.2015. Adres: loc.gov/
- [68] **Oss, H. G.**, (2015). *Iron and Steel Slag*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, ABD.
- [69] **Yılmaz, A. ve Sütas, İ.**, (2008). *Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı*. İMO Teknik Dergi.

- [70] **World Steel Association**, (2014). *Steel Industry by-products*. Alındığı tarih: 15.02.2015. Adres: www.worldsteel.org
- [71] *Ulusal Katı Atık Yönetim Kongresi* (2010). Mersin Üniversitesi, Mersin.
- [72] **U. S. Department of Transportation**, (t.y.). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Publication Number: FHWA-RD-97-148.
- [73] **Wang, L. K., Shammass, N. S. ve Hung, Y.**, (2009). *Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating, and Finishing industries*. ISBN: 978-1-4200-7223-5. CRC Press, ABD.
- [74] **Australasian Slag Association**, (2002). *A Guide to The Use of Iron and Steel Slag in Roads*. ISBN: 0 9577051 58, Avustralya
- [75] **Prezzi, M. ve Yıldırım, İ. Z.**, (2011). *Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag*. ID 463638, ABD
- [76] **Wang, G. W.**, (1992). *Properties and Utilization of Steel Slag in Engineering Applications*. University of Wollongong, Avustralya.
- [77] **Vic Roads**, (2011). *Steel Furnace Slag Aggregate (Technical note)*. Alındığı tarih: 11.01.2015. Adres: www.vicroads.vic.gov.au/
- [78] **Sofilic, T., Sofilic, U. ve Brnardic, I.**, (2012). *The Significance of Iron and Steel Slag as By-product for Utilization in Road Construction*. University of Zagreb, Hırvatistan.
- [79] **Ilyushechkin, A. Y., Roberts, D. G., French, D. ve Harris, D.J.**, (2012). *IGCC Solids Disposal and Utilisation, Final Report for ANLEC Project 5-0710-0065*. CSIRO, Avustralya.
- [80] **Kalyoncu, R. S.**, (2001). *Slag- Iron and Steel*. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook.
- [81] **Zulhan, Z.**, (t.y.). *Iron and Steelmaking Slags: Are They Hazardous Waste?*. Department of Metallurgical Engineering, Institut Teknologi Bandung, Endonezya.
- [82] **Durgun, M. Y. ve Binici, H.**, (2012). *Katkılı Boyalarla Kaplanan Betonarme Donatılarının Korozyon Performansı*. İMO Teknik Dergi 6141-6162.
- [83] **Fronek, B. A.**, (2011). *Feasibility of Expanding The Use of Steel Slag As A Concrete Pavement Aggregate*. Cleveland State University, ABD.
- [84] **Euroslags**. *Statics 2010*. Alındığı tarih: 18.03.2015. Adres: www.euroslag.com
- [85] **Bedirhanoglu, İ.**, (2011). *Yapı Mazlemesi* (Ders Notları). Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- [86] **ASTM C127**, (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, *American Society for Testing and Materials*, ABD.

- [87] **ASTM C128**, (2012). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [88] **TS EN 1097-2**, (2010). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [89] **ASTM C88**, (2005). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [90] **BS 812 - 105.2**, (1990). Elongation Index of Coarse Aggregate, *British Standard*, İngiltere.
- [91] **TS EN 1097-8**, (2010). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 8: Taş parlatma değerinin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [92] **TS EN 12697-11**, (2012). Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışimli asfalt için - Bölüm 11: Agregata ve bitüm arasındaki bağlanmanın tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [93] **ASTM C142**, (2010). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, *American Society for Testing and Materials*, USA.
- [94] **TS EN 933-9+A1:2013**, (2014). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce malzeme tayini - Metilen mavisi deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [95] **TS EN 15326+A1**, (2010). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yoğunluk ve özgül kütle tayini-Kapiler kapaklı piknometre yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [96] **TS EN 1426**, (2008). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [97] **Lexington, K.**, (2007). *The Asphalt Handbook* (7. versiyon). Asphalt Institute, ABD.
- [98] **Orhan, F.**, (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [99] **TS 3720**, 2010. Bitümlü karışımlar - Asfalt betonu - Karışım tasarımı hesap esasları - Marshall yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

EKLER

Briket No	Bitüm yüzdesi		Briket yüksekliği	Havadaki ağırlık	Sudaki ağırlık	Doygun kuru yüzey ağırlık	Hacim cm ³ V=B-C	Pratik özgül ağırlık	Max. teorik özgül ağırlık	Boşluk %	VMA %	Bitümle dolu boşluk	Akma mm	Stabilite kg	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite
	W _a	gr	Ort. mm	gr (A)	gr (C)	gr (B)		D _p	D _T	V _b	VMA	V _f				
1	4,0	48	60,2	1244,2	757,0	1260,8	503,8	2,47		5,95	14,77	59,72	2,67	1060,28	1,09	1160,01
2	4,0	48	61,0	1241,9	753,4	1257,4	504,0	2,46	2,626	6,16	14,96	58,82	2,48	1139,80	1,07	1218,76
3	4,0	48	60,9	1234,4	749,1	1248,9	499,8	2,47		5,94	14,77	59,74	2,03	1086,79	1,07	1165,39
ort1	4,0				753,1667		502,5	2,47	2,626	6,02	14,84	59,43	2,39	1095,62	1,08	1181,39
4	4,5	54	60,5	1252,5	759,7	1267,6	507,9	2,47		5,38	15,30	64,84	2,60	1245,83	1,08	1348,72
5	4,5	54	60,0	1242,3	754,5	1251,9	497,4	2,50	2,606	4,17	14,22	70,68	2,16	1007,27	1,10	1106,25
6	4,5	54	60,3	1250,9	757,7	1264,8	507,1	2,47		5,35	15,28	64,97	3,11	1192,82	1,09	1298,77
ort2	4,5				757,3		504,1	2,48	2,606	4,97	14,93	66,83	2,62	1148,64	1,09	1251,25
7	5,0	60	60,5	1256,5	761,9	1264,9	503,0	2,50		3,44	14,61	76,44	3,43	1245,83	1,08	1350,01
8	5,0	60	60,3	1254,0	761,4	1265,6	504,2	2,49	2,587	3,87	14,99	74,21	3,37	1192,82	1,09	1300,01
9	5,0	60	60,8	1258,0	763,9	1269,1	505,2	2,49		3,75	14,88	74,81	3,62	1166,31	1,07	1251,85
ort3	5,0				762,4		504,1	2,49	2,587	3,69	14,83	75,15	3,47	1201,65	1,08	1300,62
10	5,5	66	58,3	1238,2	751,2	1246,6	495,4	2,50		2,69	14,97	82,05	3,56	1272,34	1,16	1470,28
11	5,5	66	61,3	1263,9	764,7	1273,7	509,0	2,48	2,568	3,32	15,53	78,61	4,57	1033,77	1,06	1093,99
12	5,5	66	61,0	1256,3	760,2	1265,8	505,6	2,48		3,26	15,47	78,95	3,62	1139,80	1,07	1218,76
ort4	5,5				758,7		503,3	2,49	2,568	3,09	15,32	79,87	3,92	1148,64	1,09	1261,01
13	6,0	72	62,9	1268,0	764,1	1274,7	510,6	2,48		2,62	15,92	83,54	3,37	1113,29	1,01	1129,22
14	6,0	72	61,0	1251,5	756,4	1259,7	503,3	2,49	2,550	2,49	15,81	84,23	3,43	980,76	1,07	1048,70
15	6,0	72	61,6	1262,5	761,7	1273,5	511,8	2,47		3,27	16,48	80,16	4,70	954,25	1,05	1001,41
ort5	6,0				760,7333		508,6	2,48	2,550	2,79	16,07	82,65	3,83	1016,10	1,04	1059,78
16	6,5	78	62,1	1267,5	762,1	1275,9	513,8	2,47		2,58	16,87	84,69	5,59	927,75	1,04	960,32
17	6,5	78	61,7	1258,4	757,8	1266,8	509,0	2,47	2,532	2,37	16,68	85,80	4,19	980,76	1,05	1028,28
18	6,5	78	62,0	1262,9	758,1	1269,8	511,7	2,47		2,54	16,83	84,92	4,45	980,76	1,04	1017,96
ort6	6,5				759,3333		511,5	2,47	2,532	2,50	16,79	85,13	4,74	963,09	1,04	1002,19
19	7,0	84	63,2	1272,9	761,3	1280,8	519,5	2,45		2,57	17,81	85,57	5,14	1007,27	1,01	1013,87
20	7,0	84	63,1	1272,5	763,5	1280,5	517,0	2,46	2,515	2,13	17,44	87,79	4,38	848,22	1,01	856,68
21	7,0	84	61,9	1256,4	754,3	1265,5	511,2	2,46		2,27	17,56	87,06	3,75	795,21	1,04	829,15
ort7	7,0				759,7		515,9	2,46	2,515	2,32	17,61	86,81	4,42	883,57	1,020	899,90

Ek.1 Bidner tabakası için doğal agregadan elde edilen veri çizelgesi.

Briket No	Bitüm yüzdesi		Briket yüksekliği Ort. mm	Havadaki ağırlık gr (A)	Sudaki ağırlık gr (C)	Doygun kuru yüzey ağırlık gr (B)	Hacim cm ³ V=B-C	Pratik özgül ağırlık D _p	Max. teorik özgül ağırlık D _T	Boşluk % V _h	VMA % VMA	Bitümle dolu boşluk V _f	Akma mm	Stabilite kg	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite
	W _a	gr														
1	4,0	58,0	62,9	1494,5	1010,3	1524,3	514,0	2,91		7,72	15,85	51,31	2,92	2173,574	1,01	2202,77
2	4,0	58,0	63,0	1498,8	1009,6	1529,8	520,2	2,88	3,151	8,56	16,62	48,50	2,73	2279,602	1,01	2304,29
3	4,0	58,0	64,2	1491,2	1003,8	1523,0	519,2	2,87		8,85	16,88	47,60	2,60	2306,109	0,98	2267,05
ort1	4,0				1007,9	1525,7	517,8	2,89	3,151	8,37	16,45	49,14	2,75	2253,10	1,00	2258,04
4	4,5	65,3	61,7	1500,8	1015,3	1524,4	509,1	2,95		5,50	15,09	63,54	2,67	2120,56	1,05	2219,20
5	4,5	65,3	61,8	1500,3	1016,8	1527,5	510,7	2,94	3,120	5,83	15,39	62,11	3,05	2094,053	1,04	2185,42
6	4,5	65,3	63,0	1508,5	1014,5	1533,1	518,6	2,91		6,76	16,22	58,34	3,30	2332,616	1,01	2359,90
ort2	4,5				1015,5	1528,3	512,8	2,93	3,120	6,03	15,57	61,33	3,01	2182,41	1,03	2254,84
7	5,0	72,5	62,6	1511,1	1016,3	1524,9	508,6	2,97		3,83	14,83	74,20	2,92	2200,081	1,02	2251,08
8	5,0	72,5	64,0	1508,3	1005,6	1525,8	520,2	2,90	3,089	6,15	16,89	63,60	3,30	2279,602	0,99	2248,08
9	5,0	72,5	61,0	1464,7	981,4	1471,2	489,8	2,99		3,20	14,28	77,57	2,54	2279,602	1,07	2435,22
ort3	5,0				1001,1	1507,3	506,2	2,95	3,089	4,39	15,33	71,79	2,92	2253,10	1,03	2311,46
10	5,5	79,8	62,5	1498,3	1010,9	1512,5	501,6	2,99		2,38	14,78	83,89	2,98	2147,067	1,02	2198,77
11	5,5	79,8	63,0	1513,4	1019,1	1532,2	513,1	2,95	3,060	3,61	15,85	77,24	3,18	2094,053	1,01	2120,36
12	5,5	79,8	63,0	1522,5	1026,8	1530,0	503,2	3,03		1,12	13,68	91,81	3,37	2067,546	1,01	2089,94
ort4	5,5				1018,9	1524,9	506,0	2,99	3,060	2,37	14,77	84,31	3,18	2102,89	1,02	2136,36
13	6,0	87,0	63,4	1533,4	1027,2	1543,4	516,2	2,97		2,00	15,65	87,19	3,94	1935,011	1,00	1939,54
14	6,0	87,0	62,6	1528,6	1023,1	1536,2	513,1	2,98	3,031	1,72	15,41	88,83	3,30	1828,983	1,02	1868,09
15	6,0	87,0	62,6	1526,0	1021,6	1532,4	510,8	2,99		1,45	15,17	90,47	3,62	1988,025	1,02	2034,10
ort5	6,0				1024,0	1537,3	513,4	2,98	3,031	1,72	15,41	88,83	3,62	1917,34	1,02	1947,25
16	6,5	94,3	62,5	1491,1	1003,6	1502,1	498,5	2,99		0,41	15,47	97,34	3,49	1828,983	1,03	1876,34
17	6,5	94,3	64,7	1541,9	1030,1	1551,6	521,5	2,96	3,004	1,56	16,44	90,51	3,68	2120,56	0,97	2059,04
18	6,5	94,3	63,4	1481,1	997,2	1495,1	497,9	2,97		0,96	15,93	93,98	3,56	1696,448	1,00	1699,01
ort6	6,5				1010,3	1516,3	506,0	2,97	3,004	0,98	15,95	93,94	3,58	1882,00	1,00	1878,13
19	7,0	101,5	64,7	1553,6	1029,3	1559,2	529,9	2,93		1,50	17,53	91,45	3,87	1404,871	0,97	1363,08
20	7,0	101,5	64,7	1546,2	1033,6	1555,4	521,8	2,96	2,976	0,45	16,65	97,32	3,68	1749,462	0,97	1700,00
21	7,0	101,5	63,9	1535,6	1024,4	1541,8	517,4	2,97		0,29	16,51	98,26	4,06	1351,857	0,99	1336,35
ort7	7,0				1029,1	1552,1	523,0	2,95	2,976	0,74	16,90	95,68	3,87	1502,06	0,977	1466,47

Ek. 2 Binder tabakası için EAO cürufu agregasından elde edilen veri çizelgesi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Burak Özüğurlu
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul – 03.03.1989
E-posta : ozugurlu@itu.edu.tr
Lisans : 2012, İTÜ, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği