İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem MUTLUGELDİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem MUTLUGELDİ
(501121425)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

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

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121425 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cem MUTLUGELDİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ"** 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. Servet İbrahim TİMUR** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında atık madde olarak değerlendirilen elektrik ark fırını cürufunun karayolu esnek üstyapı bitümlü temel tabakasında agrega olarak değerlendirilmesi tarafımdan incelenmiştir.

Bu çalışmada bana yol gösteren ve karşılaştığım sorunlara mühendislik bakış açısı ile yaklaşmamı sağlayan değerli danışman hocam Sayın Öğr. Gör. Dr. A. Faik İYİNAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışma sırasında karşılaştığım her sorunda yoğun temposuna rağmen bana yardımcı olan ve vakit ayıran Sayın İnşaat Yüksek Mühendisi Fatih YONAR'a minnettarlarımı sunarım.

Son olarak yüksek lisans öğrenimim boyunca bana maddi ve manevi destek veren anneme, babama ve abime sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mayıs, 2015

Cem MUTLUGELDİ

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. KARAYOLU ÜSTYAPILARI **3**
2.1 Rijit Üstyapılar 4
2.1.1 Taban Zemini 5
2.1.2 Temel ve alttemel tabakası 5
2.1.3 Beton kaplama 6
2.2 Esnek Üstyapılar 6
2.2.1 Taban Zemini 8
2.2.2 Alttemel tabakası 9
2.2.3 Temel tabakası 9
2.2.4 Kaplama tabakası 10
2.3 Kompozit Üstyapı 10
3. ESNEK ÜSTYAPIDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ **13**
3.1 Bitümlü Bağlayıcılar 13
3.2 Agregalar 14
3.2.1 Alttemel tabakasında agrega kullanımı 15
3.2.2 Temel tabakasında agrega kullanımı 17
3.2.3 Kaplama tabakasında agrega kullanımı 20
4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ **23**
4.1 Demir Çelik Sektörü 23
4.2 Demir Çelik Üretimi 26
4.2.1 Yüksek Fırın 27
4.2.2 Bazik oksijen fırını (BOF) 28
4.2.3 Elektrik ark fırını (EAF) 32
5.CÜRUF OLUŞUMU VE KULLANIM ALANLARI **37**
5.1 Yüksek Fırın Cürufu 39
5.2 Bazik Oksijen Fırını (BOF) Cürufu 41
5.3 Elektrik Ark Fırını (EAF) Cürufu 42
6. BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA EAF CÜRUFUNUN VE DOĞAL AGREGANIN KULLANIMI İLİŞKİN LABORATUVAR ÇALIŞMASI **45**
6.1 Kullanılan Malzemeler 45
6.2 Malzemelere Uygulanan Fiziksel Deneyeler 46
6.2.1 Agrega deneyleri 46

6.2.1.1 Elek analizi 46
6.2.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi 48
6.2.1.3 Los Angeles deneyi 52
6.2.1.4 Hava tesirine karşı dayanıklılık (donma-çözme) deneyi 53
6.2.1.5 Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi 55
6.2.1.6 Yassılık indeksi deneyi 56
6.2.1.7 Soyulma mukavemeti deneyi 57
6.2.1.8 Organik madde deneyi 59
6.2.1.9 Metilen mavisi deneyi 59
6.2.2 Bitüm deneyleri 61
6.2.2.1 Penetrasyon deneyi 61
6.2.2.2 Özgül ağırlık deneyi 61
6.2.3 Marshall deneyi 62
6.2.3.1 Marshall briketlerinin hazırlanması 63
6.2.3.2 Marshall akma ve stabilitenin ölçülmesi 64
6.2.3.3 Marshall deneyi hesapları 64
7. DENEY SONUÇLARI 67
7.1 Agreganın Fiziksel Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar 67
7.1.1 Elek analizi 67
7.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları 67
7.1.3 Los Angeles deneyi sonuçları 68
7.1.4 Hava tesirine karşı dayanıklılık (donma-çözme) deneyi sonuçları 69
7.1.5 Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi sonuçları 69
7.1.6 Yassılık indeksi deneyi sonuçları 70
7.1.7 Soyulma mukavemeti deneyi sonuçları 70
7.1.8 Organik madde deneyi sonuçları 70
7.1.9 Metilen mavisi deneyi sonuçları 70
7.2 Bitüm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar 71
7.3 Marshall Deneyi Sonuçları 71
7.3.1 Doğal agreganın marshall deneyi grafikleri 72
7.3.2 Doğal agreganın optimum bitüm yüzdesi 75
7.3.3 EAF cürufunun marshall deneyi grafikleri 76
7.3.4 EAF cürufunun optimum bitüm yüzdesi 79
7.3.5 Grafiklerin karşılaştırılması 80
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 87
KAYNAKLAR 91
EKLER 95
ÖZGEÇMİŞ 99

KISALTMALAR

BSK : Bitümlü Sıcak Karışım
BOF : Bazik Oksijen Fırını
CBR : California Bearing Ratio
ÇBGT : Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel
EAF : Elektrik Ark Fırını
EN : European Norm
D_p : Toplam Karışımın Özgül Ağırlığı
D_{port} : Toplam Karışımın Ortalama Hacim Özgül Ağırlığı
D_t : Karışımın Maksimum Teorik Özgül Ağırlığı
DOP : Declaration Of Performance
G_1 : Kaba Agreganın Özgül Ağırlığı
G_2 : İnce Agreganın Özgül Ağırlığı
G_3 : Mineral Fillerin Özgül Ağırlığı
G_b : Bitümün Özgül Ağırlığı
GT : Granüler Temel
G_{ag} : Agrega Karışımının Özgül Ağırlığı
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
KTŞ : Karayolu Teknik Şartnamesi
TS : Turk Standartları
TÜPRAŞ : Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.
OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development
PMT : Plent-Miks Temel
V_h : Hava Boşluğu
V_{MA} : Agregalar Arası Boşluk
V_f : Asfalt Dolu Boşluk
W_a : Bitümün Ağırlıkça Yüzdesi
W_b : Toplam Karışımın Bitüm Yüzdesi
WSA : World Steel Association
%K : Kaba Agreganın Yüzdesi
%İ : İnce Agreganın Yüzdesi
%M : Mineral Fillerin Yüzdesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Alttemel tabakasının granülometri limitleri 16
Çizelge 3.2 : Alttemel tabakasının fiziksel özellikleri..... 16
Çizelge 3.3 : Alttemel tabakasının sıkıştırma kriterleri..... 17
Çizelge 3.4 : Temel tabakasının kaba agreganın fiziksel özellikleri..... 17
Çizelge 3.5 : Temel tabakasının ince agreganın fiziksel özellikleri..... 18
Çizelge 3.6 : Granüler temel tabakasının granülometri limitleri 18
Çizelge 3.7 : Granüler temel tabakasının sıkıştırma kriterleri 19
Çizelge 3.8 : Plent-miks temel tabakasının granülometri limitleri 19
Çizelge 3.9 : Plent-miks temel tabakasının sıkıştırma kriterleri 19
Çizelge 3.10 :Çimento bağlayıcılı stabilize temel tabakasının granülometri limitleri 20
Çizelge 3.11 : Çimento bağlayıcılı stabilize temel tabakasının sıkıştırma kriterleri..20
Çizelge 3.12 : Binder tabakası için gradasyon limitleri 21
Çizelge 3.13 : Aşınma tabakası için gradasyon limitleri..... 21
Çizelge 3.14 : Kaplama tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri 22
Çizelge 3.15 : Kaplama tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri 22
Çizelge 4.1 : Yıllık ham çelik üretim miktarı 26
Çizelge 4.2 : Ham çelik üretici ülkeler ve üretim miktarları 26
Çizelge 4.3 : EAF girdi ve çıktıları 34
Çizelge 5.1 : Cürufun bazı büyük ülkelerde kullanım oranları..... 39
Çizelge 5.2 : Elektrik ark fırını (EAF) cürufu ve diğer doğal agregaların teknik özellikleri 44
Çizelge 5.3 : Elektrik ark fırını (EAF) cürufunun mineral bileşenleri 44
Çizelge 6.1 : EAF cürufu ve doğal agreganın kimyasal analizi..... 45
Çizelge 6.2 : Kullanılan elek aralıkları..... 46
Çizelge 6.3 : Kaba agrega için özgül ağırlık ve su emme oranı tayini sırasında kullanılan numune ağırlıkları..... 48
Çizelge 6.4 : Malzeme elek aralıkları ve karşılık gelen elek boyutu 56
Çizelge 6.5 : Yassılık indeksi için kullanılan numune miktarları..... 56
Çizelge 7.1 : Bitümlü temel için kullanılan gradasyon limitleri..... 67
Çizelge 7.2 : Kaba, ince agrega ve mineral filler için zahiri özgül ağırlık ve hacim özgül ağırlık değerleri..... 68
Çizelge 7.3 : Kaba ve ince agrega için su emme oranları..... 68
Çizelge 7.4 : Los Angeles aşınma değeri..... 69
Çizelge 7.5 : Donma-çözme deneyi sonuçları 69
Çizelge 7.6 : Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi sonucu 69
Çizelge 7.7 : Yassılık indeksi deney sonuçları 70
Çizelge 7.8 : Soyulma mukavemeti deneyi sonuçları 70
Çizelge 7.9 : Metilen mavisi deneyi sonucu 70
Çizelge 7.10 : Bitüm deneylerinden elde edilen sonuçlar 71
Çizelge 7.11 : Doğal agreganın optimum bitüme göre hesaplanan değerler ve şartname limitleri 75

Çizelge 7.12 : Cürufun optimum bitüme göre hesaplanan değerler ve şartname limitleri..... 79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.2 : Kaplamalara göre yük dağılımı 5
Şekil 2.2 : Bitümlü kaplama kesiti 8
Şekil 2.3 : Esnek üstyapının enine kesiti 8
Şekil 2.4 : Bitümlü temelin sıkıştırılması 10
Şekil 3.1 : Penetrasyon ölçüm cihazı.....13
Şekil 3.2 : Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması 14
Şekil 3.3 : Yol yapımında kullanılan agregalar.....15
Şekil 4.1 : Bir entegre çelik tesisinde üretim akışı.....27
Şekil 4.2 : Yüksek fırın.....28
Şekil 4.3 : Bazik oksijen fırını 30
Şekil 4.4 : BOF yönetim aşamaları 31
Şekil 4.5 : Yüksek fırından gelen pik demirin BOF'na dökülmesi 31
Şekil 4.6 : Bazik oksijen fırını ve ana ekipmanlar 32
Şekil 4.7 : Elektik ark fırınının içerisindeki grafit elektrotları.....33
Şekil 4.8 : Elektrik ark fırını işlemi.....33
Şekil 4.9 : Elektrik ark fırınlı fabrika 34
Şekil 5.1 : Yol yapımında cüruf kullanımı 37
Şekil 5.2 : Demiryolu balastı olarak cüruf kullanımı 39
Şekil 5.3 : Yüksek fırın cürufu.....40
Şekil 5.4 : Konverter (BOF) prosesinin adımları. 41
Şekil 5.5 : Elektrik ark cürufunun görüntüsü.....43
Şekil 6.1 : Kullanılan elekler 47
Şekil 6.2 : Numunenin eleme aşaması 47
Şekil 6.3 : Hazırlanan numuneleri tel sepete konuluşu 49
Şekil 6.4 : Kuru numunenin tartılması 49
Şekil 6.5 : Hassas terazi ve vakum makinesi 51
Şekil 6.6 : Piknometrenin referans çizgisine kadar su ile doldurulması.....51
Şekil 6.7 : Los angeles makinesi 53
Şekil 6.8 : Los angeles deneyi bilyeleri.....53
Şekil 6.9 : Tozlardan arındırmak için malzemenin yıkanması.....54
Şekil 6.10 : Malzemenin üzerine magnezyum sülfat çözeltisinin eklenmesi 55
Şekil 6.11 : Yassılık indeksi elekleri.....57
Şekil 6.12 : Yassılık indeksi eleklerden eleme işlemi.....57
Şekil 6.13 : Numunelerin üzerine 5 gr doplu bitüm eklenmesi 58
Şekil 6.14 : Etüvden çıkartılmış yüzeyi soyulmuş numune.....58
Şekil 6.15 : Metilen mavisi deneyinde kullanılan mikser.....60
Şekil 6.16 : Filtre kağıdındaki çözeltinin renk değişimi.....61
Şekil 7.1 : Marshall deneyi sonuçlarında kullanılan tanımlar.....71
Şekil 7.2 : Boşluk (Vh) - bitüm oranı grafiği.....72
Şekil 7.3 : Agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm oranı grafiği.....73
Şekil 7.4 : Asfaltla dolu boşluk (Vf) – bitüm oranı grafiği 73
Şekil 7.5 : Pratik özgül ağırlık – bitüm oranı grafiği.....74

Şekil 7.6 : Düzeltilmiş stabilite – bitüm oranı grafiği..... 74
Şekil 7.7 : Akma – bitüm oranı grafiği 75
Şekil 7.8 : Boşluk (Vh) - bitüm oranı grafiği 76
Şekil 7.9 : Agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm oranı grafiği..... 77
Şekil 7.10 : Asfaltla dolu boşluk (Vf) – bitüm oranı grafiği 77
Şekil 7.11 : Pratik özgül ağırlık – bitüm oranı grafiği 78
Şekil 7.12 : Düzeltilmiş stabilite – bitüm oranı grafiği 78
Şekil 7.13 : Akma – bitüm oranı grafiği..... 79
Şekil 7.14 : Doğal agrega ile EAF cürufunun pratik özgül ağırlıkları – bitüm yüzdeleri 80
Şekil 7.15 : Doğal agrega ile EAF cürufunun boşluk (Vh) – bitüm yüzdeleri..... 81
Şekil 7.16 : Doğal agrega ile EAF cürufunun agregalar arası boşluk (VMA)– bitüm yüzdeleri 82
Şekil 7.17 : Doğal agrega ile EAF cürufunun asfaltla dolu boşluk (Vf) – bitüm yüzdeleri. 83
Şekil 7.18 : Doğal agrega ile EAF cürufunun akma – bitüm yüzdeleri..... 84
Şekil 7.19 : Doğal agrega ile EAF cürufunun düzeltilmiş stabilite – bitüm yüzdeleri 85

ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Yüksek lisans tez çalışması olarak sunulan bu çalışmada, elektrik ark fırını cürufunun bitümlü temel tabakasında agrega olarak kullanımı Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'te bulunan bitümlü temel kriterleri göz önüne alarak değerlendirilmiştir.

İnşaat sektörünün ülke ekonomisindeki yeri gün geçtikçe artmaktadır. Bununla beraber inşaat sektöründe kullanılan malzemelerin tüketimi de bu ivmeyle birlikte artmaktadır. Ülke kaynaklarımızın sınırlı olduğu göz önüne alındığında bir çok sektörde yapıldığı gibi geri dönüşümü mümkün olan atık maddeleri kullanımı hem çevremize hemde üretim maliyetlerimizi olumlu yönde etkiler.

Çalışmanın birinci bölümünde tezin amacı ve kapsamı açıklanmış ikini bölümde ise karayolu üstyapısı hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise esnek üstyapıda kullanılan malzemeler ve bunların özellikleri verilmiştir. Bu bölümde bitüm hakkında genel bilgiler verilirken agregaların esnek üstyapı tabakalarında kullanımları ayrı ayrı incelenmiş ve agregaların üstyapı tabakalarında kullanımına ilişkin Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'te yer alan gradasyon limitleri, sıkıştırma kriteleri ve fiziksel özelliklerinin şartname limitleri ve deney standartları çizelgeler halinde sunulmuştur. Dördüncü bölümde Türkiye'de ve dünyada demir çelik sektörü ve demir çelik üretimi anlatılmıştır. Bu bölümde demir çelik üretimi hakkında istatistiki bilgiler verilmiş ve demir çelik üretim işlemleri anlatılmak istenmiştir. Beşinci bölümde cüruf oluşumu ve cürufun günümüzde kullanım alanı anlatılmıştır. Kullanım alanlarıyla ilgili istatistiki bilgiler verilmiş ve cüruf oluşumu detaylandırılarak anlatılmıştır. Altıncı bölümde EAF cürufunun ve doğal agreganın laboratuvar çalışması anlatılmıştır. Deney esnasında kullanılan malzemeler anlatılmış ve bitümlü temelde Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'te yer alan elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyi, aşınma (Los Angeles) deneyi, hava tesirine karşı donma çözülme deneyi, kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi, yassılık indeksi deneyi, soyulma mukavemeti deneyi, organik madde deneyi ve metilen mavisi deneyi olan agrega deneyleri ve penetrasyon deneyi ve agrega deneyi olan bitüm deneylerinin yapım aşamaları açıklanmıştır. Daha sonrada Marshall deneyinin yapım aşamaları ve hesap yöntemi anlatılmıştır. Yedinci bölümde ise, altıncı bölümde yer alan agrega, bitüm ve marshall deneyinin sonuçları hesaplanmış ve şartname limitleriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümü olan sekizinci bölümde deney sonuçları değerlendirilmiş ve bitümlü temel tabakasında EAF cürufunun kullanılabilirliği ile ilgili sonuçlar verilmiştir.

INVESTIGATION OF THE USEAGE OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AS AGGREGATE IN BITUMINOUS TREATED BASE

SUMMARY

This study is presented as a graduate thesis, The slag is assessed by its usage as an aggregate bituminous treated base, taking into account of basic criterias specified in Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification 2013.

Enverimental problem showed up with industrial revolution. Although people are increasing their startdart of life economically by developtment of industry and technology, eart start to get a sick by polluted. As long as we arent stop this chaos, our resersours will be finish. So we will engaged to local wars, uncoordinated industrialization, famisment and disturp natural balance. As long as we can recycling to plastics, paper, some fossil oil products, rocks etc. As far as we know collection, transportation, transaction and disposal of waste materials are part of waste management.

In 2014, 1636 million ton steel are produce in the world, besides 34 million tonnes steel are produce in Turkey. Nearly 130 – 150 kg slag have been released druring producing 1 ton steel. As long as calculate slag producing, approximately 5,1 million tonnes slag have been released every year in Turkey.

In our country, the place of construction sector in economy is incrasing gradually. Following that the demand of materials used in the construction sector is also incrasing. Also pavement construction is more consume natural resources than other branches of civil engineering. Huge quantities of natural materiales, rocks, fossil oil and sand are constructed into kilometers of constructed roads or in reconstruction of fault roads. Given the limited resources of our country,as in many areas the recycling of waste materials to useful resources is beneficial to both environment and minimization of the production costs.

As far as we know, we are using huge of amount of aggregate in the construction sector. Every year we are using million tonnes aggregate for built something. If we can give some example, need of aggregate for hospital building is 2,800 tones, for a hotel building is 1,100 tones and for 1 km highway construction is 30,000 tones. This example show us how much aggregate we are using in order construction. Acording to not reduce aggregate amount, we can change aggregate materials.

Every year we are spent a lot of money for road building. As far as we know aggregate is huge amount in budget of road building. If we can replace natural aggregate to blast furnace slag, electic ark furnace slag or basic oxygen furnace slag, we can save our natural resource and our money.

Blast furnace slag, electic ark furnace slag and basic oxygen furnace slag are stocked as wasted materials. However, they havent a classification. If goverment and some big firm are deal for useage such kind of slag, it will be helpful our natural resources and enverimental polluted.

In the first part of the study, the purpose and the scope of the thesis is explained.

İn the second part the information about pavement types (rigid, flexiable and composit), subbase course and granular layers (subbase, base) are given.

The third part of the study describes materials used in flexible highway pavements and their properties. In this part, while general information about bitumen is given, the useage of aggregate in flexible highway pavements are exmined seperately according to Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification 2013, the specification limits and test standards of area gradiation limits, compression criterias and physical properties are presented in charts.

In the fourth part, Steel industry and steel production in the World and in Turkey are described. In that part statistical information about steel production is given and basic parts of the steel manufacturing processes are described. In addition to this subjects, in this part give main information about electic ark furnace and basic oxygen furnace.

In the fifth part, slag formation and current usage of slag is explained. In this section, given three types of slag which are called as blast furnace slag, electic ark furnace slag and basic oxygen furnace slag. And given some staticals data about use of blast furnace slag, electic ark furnace slag and basic oxygen furnace slag.

In the sixth part of the study, the laboratuary operation of EAF slag and natural aggregate is described. The materials used in experiment environment are given and in bituminous treated base, experiments described in Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification 2013 namely sieve analysis, specific bulk density and water absorbtion experiment, abrasion (Los Angles) experiment, frost and defrost against air influence experiment, clay lumps and friable grain ratio test, flatness index test, peel strength test aggregation experimens consisting of organic matter experiment and methylene blue experiment and penetration test and also bituminous experiment which is an aggregation test are explained step by step. Afterwards, experiment stages of Marshall experiment and calculation method are described.

In the seventh part, results of the aggregate, bitumen and marshall experiment, described in sixth chapter, are calculated and compared with the specification limits. In this part, given some graph and calculate about natural aggregate and electic ark furnace slag. Useage of electic ark furnace slag and natural aggregate's graph, find optimum bitumen for each of them. And compare electric ark furnace slag's graph and natural aggregate's graph.

The eighth chapter as conclusion, test results are evaluated and conclutions regarding the usability of electric ark furnace slag in bituminous treated base, are given. Mainly, electric ark furnace slag has need some classfication of current standarts as fill material and granuler layers of pavement.

1. GİRİŞ

18. yy'de İngiltere'de ortaya çıkan sanayi devriminin ardından dünyada ülkeler geniş çaplı bir hammadde arayışı içine girmiştir. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılayabilmek için daha fazla üretim olmasının gerekliliği dünya üzerinde yerel kaynakları hızlı bir biçimde tüketmeye başlamamızın ilk adımıdır. Daha fazla üretim yapabilmek için daha gelişmiş makinelerin olması gerekliliğinden teknolojide sanayi devrimiyle birlikte hızlıca yükselişe geçmiştir. İngiltere'de kömür madenlerinden çıkan malzemeyi daha kolay ve daha ucuza merkezlere iletmek için geliştirilen raylar günümüzdeki tren teknolojisinin temelini oluşturması buna bir örnektir. Hızla gelişmekte olan teknoloji ve sanayi beraberinde birçok atık madde ortaya çıkarmaktaydı. Sanayi devriminin başlarında olmasından dolayı bu atık maddeleri geri dönüştürerek tekrar kullanmak o hammaddeyi kaynağından çıkartarak kullanmaktan daha pahalı olduğu için uzun yıllar geri dönüşüm fikri ortaya atılmamıştı. 1929 yılında Amerika Birleşik Devleti'nde ortaya çıkan "Büyük Buhran"dan sonra yeni ürün alamayan Amerikan halkı zoraki bir bilinçlenme ile kullandıkları ürünleri tekrar tekrar kullanmışlardır. 2. Dünya savaşı sırasında tekrar dünyada hammadde sıkıntısı baş göstermekteydi. Bu insanları tekrardan geri dönüşüm yapmaya zorlamaktaydı. Savaşın bitmesiyle birlikte kaynak sıkıntısı çeken ülkelerde geri dönüşüm devam ederken savaş sonrası zenginleşen ülkeler atık üretme miktarlarını giderek arttırıyordu. 20. Yüzyılın başlarından itibaren artık en kıymetli enerji maddesi olan petrol işlenmeye başlanmıştı. Zengin ülkeler petrolü damıtarak jet yakıtı, benzin, dizel vs. gibi yakıtlar üretirken petrolün yakıt olarak kullanılmayacak bitümü yol yapım çalışmalarında kullandılar. Karayolu o yıllarda gözde bir ulaşım yolu olmaya başlamıştı. Karayolu ve demiryolunun kullanılabilirliği sayesinde artık ulaşım maliyeti düşen mallar daha ucuza mal edilip diğer ülkelere satılabiliyordu.

Ülkemizde inşaat sektöründe malzeme giderlerinin yapı büyük maliyetler kaplamaktadır. Bu malzemelerin başında çimento ve agrega gelmektedir. Son yıllarda yapılan yol projeleriyle birlikte bu maliyetlerin büyüklüğü daha büyük maliyetler aldığından bazı malzemeler yerine geri dönüştürülen malzemeler

kullanılarak maliyetlerden kısmak ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlayacaktır. 1 km karayolu inşaatı için yaklaşık 30.000 ton agrega kullanıldığı göz önüne alındığında bunun ne denli büyük bir maliyet kazancı getireceği açıktır. Bu fikirle Türk firmaları son yıllarda atık maddeleri değerlendirme çalışmalarına hız vermiştir. Atık maddelerin asfaltta ve betonda dayanımı arttırıcı etkisini araştıran birçok çalışma yayımlanmıştır. İnşaat sektöründe kullanılan başlıca atık maddeler şunlardır; mermer, kömür külü, cüruf, uçucu kül, cam vs.

Sanayileşmenin getirdiği çevre kirliliğinin önlemek ve bu atıkların geri dönüşümünü sağlamak artık kaçınılmaz bir gereklilik olmuştur. Bu ve bunun gibi atıkların geri kazanımını sağlamak için dünyada ve ülkemizde Katı Atık Kontrol Yönetmeliği desteklenmelidir.

Bu çalışmada, EAF cürufunun bitümlü temel tabakasında KTŞ 2013'te yer alan Tip-A granülometrisine göre agrega olarak kullanılıp kullanılamayacağı değerlendirilmiştir.

2. KARAYOLU ÜSTYAPILARI

Karayolu; tüm kara taşıtları ve yaya ulaşımı için güvenlik parametresi de göz önünde bulundurularak belli standartlara göre yapılmış ve işaretlenmiş kamu hizmetine açık arazi şeridi, yol, otoyol, köprüler ve benzeri yapı alanlarıdır [1].

Karayolu yapısı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak seçilmiş olan bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen yüksekliklere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşaat edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır.

Karayolu altyapısı, yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölgedir. Altyapı; yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak, yarma kesimlerinde tesviye yüzeyini oluşturmak amacıyla yapılan dolgu çalışmaları da alt yapıya dahildir. Ayrıca; köprü, viyadük, tünel, menfez ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı olarak kabul edilir [2].

Karayolu üstyapısı, taşıtlardan kaynaklanan dingil yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen çoğunlukla alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır [3].

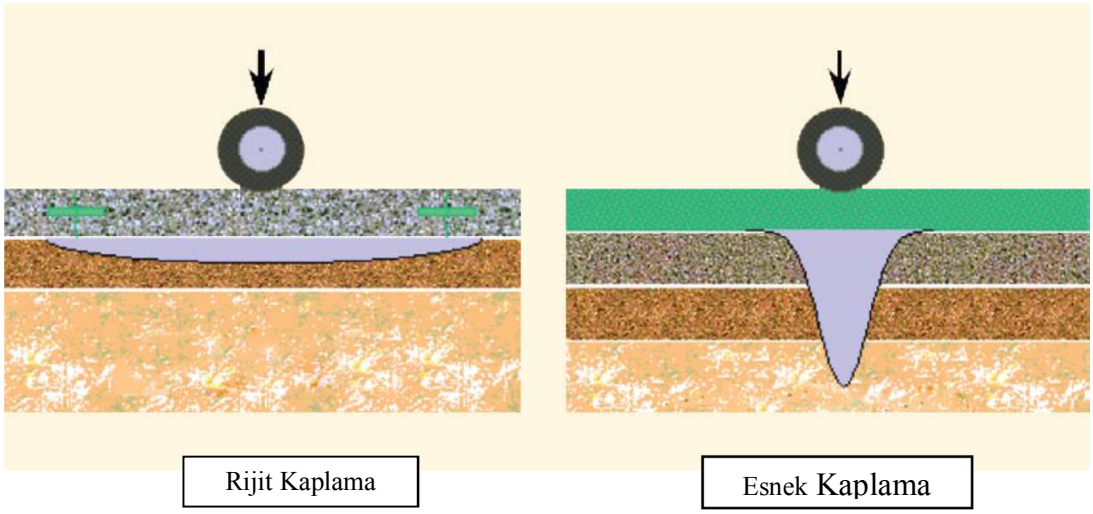
Karayolu üstyapı inşaatında kaplama tabakası kullanılan malzemelerine ve yapım tekniklerine göre esnek üstyapı, rijit üstyapı ve kompozit üstyapı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Yol projelendirilirken üstyapı seçiminde başta taban zemini, hava koşulları ve trafik yükü olmak üzere birçok parametre göz önüne alınır ve uygun üstyapı seçilir.

2.1 Rijit Üstyapılar

Çimento betonu ile yapılan kaplamalarla oluşturulan üst yapıya "Rijit Üstyapı" ya da "Beton Yollar" denir. Yol kaplaması olarak betonun görevi trafik yüklerini tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmasını engellemektir. Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabakaların özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen temel ve alt temel tabakaları ile mevcut taban zemininin özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle projelendirme sırasında, taban zemini, temel ve alttemel malzemeleri betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir.

Beton yollar enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış 20 - 25 m^2 alana sahip plaklar halinde inşa edilebildiği gibi derzsiz olarak da inşa edilebilir. Beton plağın rijitliğinin yüksek olması nedeniyle taban zemininde oluşan gerilmeler geniş alana yayılır. Bu da kötü zeminlerde beton yolların kullanılabilirliğini arttırır [4]. Beton, çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağıntı lineer değildir. Ayrıca, yükler kalktıktan sonra bir süre, betonda kalıcı deformasyonlar görülür. Daha sonra beton yavaş yavaş ilk durumuna döner. Bir tekerlek yükü bir beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun kamyon trafiği taşıyan bir beton yolda bu gerilme değişikleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ile basınç arasında değişen sürekli gerilmeler oluşur, bu da zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. Söz konusu bu tip gerilmelerin, betonun sürekli direncinin çok altında bulunması gerekir. Diğer malzemeler gibi beton da sıcaklığın artmasına veya azalmasına bağlı olarak genişlemekte veya büzülmektedir. Buna ek olarak kaplamanın alt ve üst yüzeyleri günlük ve mevsimlik sıcaklık ve nem farkları nedeniyle eğilme ve bükülmelere uğrar [5].

Üst kaplama tabakası trafikte sürüş güvenliği ve konforunu sağlayacak yüzeyi oluşturur. Trafik yükü ve çevre koşullarına doğrudan maruz kaldığı için yeterli dayanım ve dayanıklılıkta olmalıdır. Rijit üstyapılarda beton kaplama betonun yüksek dayanımı ve elastisite modülü dolayısı ile rijit bir plak gibi çalışır. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine iletilmesi Şekil 2.1'de görüldüğü gibi birbirinden farklıdır [6].



Şekil 2.1: Kaplamalara göre yük dağılımı [6].

Esnek üstyapılarda asfalt kaplama tabakasına gelen trafik yükü sırası ile temel ve alttemel tabakalarına yayılarak altyapıya, yani doğal zemine intikal eder. Bu nedenle yükün taşınmasında her tabaka önemlidir. Tabaka kalınlıkları yüke ve zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Aynı koşullarda esnek üstyapı toplam kalınlığı rijit üstyapınınkinden daha fazla olması gerekir.

Rijit üstyapılarda ise beton kaplama tabakası (beton plak) betonun yüksek elastisite modulü ve rijitliği sayesinde yükü büyük ölçüde karşılar. Doğal zemine göreceli olarak çok daha küçük gerilme intikal eder. Zemin özellikleri tabaka kalınlığının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaz. Temel tabakası beton plak için düzgün bir taban oluşturulması ve yeterli drenaj sağlanması amacı ile hazırlanır [6].

2.1.1 Taban zemini

Taban zemini sıkıştırılmış doğal zeminden oluşur. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir [7]. Bu tabakanın yolda oluşacak gerilmelere karşı koyması gerekmektedir. Eğer gerekiyorsa yapılacak olan karayolunun trafik yüküne, yol kalitesine ve iklim şartlarına bağlı olarak zemin ıslah edinir. Bu zeminin esas görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyaç vardır [7].

2.1.2 Temel ve alttemel tabakası

Beton kaplama altında kullanılan alttemel tabakasının amacı beton plağa üniform stabil bir destek sağlamaktır. Tüm beton kaplamalar için minimum 10 cm alttemel tabakası gereklidir. Eğer ekonomik ise alttemel kalınlığını artırarak zemin

dayanımını ifade eden "k" (MN/m^3) değerinin yükseltilmesi ile beton kaplama kalınlığının azaltılması mümkündür. Dere malzemesi, kırmataş agrega, bitümlü temel tabakası, çimento ile stabilize edilmiş temel (grobeton) ve çimento ile stabilize edilmiş zemin tabakaları alttemel tabakası olarak kullanılabilir [8].

2.1.3 Beton kaplama

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

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

Derzli donatısız beton kaplama en çok kullanılan beton yol kaplamasıdır. Döşemeler genelde bir şerit genişliğinde 3,7 m ile 6,1 m genişliği arasında inşaat edilmektedir.

Derzli donatılı beton kaplamalarda donatı olarak çelik ağ kullanılmaktadır. Beton içerisine donatı koyulması sayesinde derzler arasındaki mesafe 8,2 m ile 13,7 m arasına çıkabilmektedir.

Derzsiz donatılı beton kaplama sürekli olarak çelik donatısı olan genleşme derzleri bulunmayan kaplama türüdür. Uzun yıllar az bakım istemesi ve servis ömrünün uzunluğu yanında ilk yapım zorluğu ve yüksek maliyeti vardır.

2.2 Esnek Üstyapılar

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapılara "Esnek Üstyapı" denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları vasıtasıyla taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup, stabilitesi, adezyon kuvveti, dane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır [4].

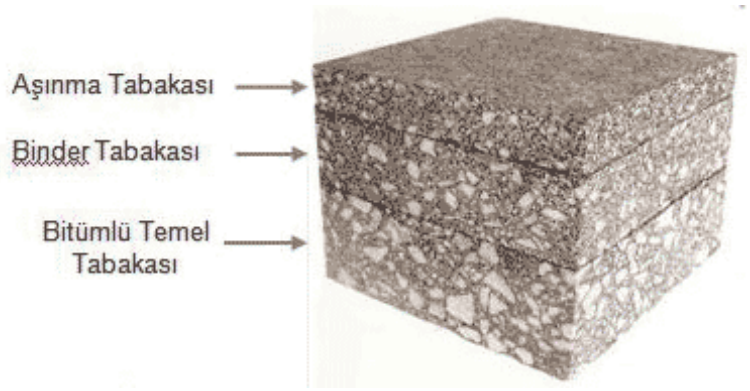
Esnek üstyapılar (asfalt kaplamalar) için uygun ve ekonomik bir tasarım, diğer mühendislik yapılarının analizi kadar önem taşımaktadır. Yetersiz tasarlanmış bir üstyapı, normalden daha kısa bir süre içinde bozulacak ve onarım maliyetleri çok yüksek olacaktır. Kaynak israfına yol açacak aşırı tasarım durumunda ya da tasarım

için uygun ve ekonomik olmayan malzemelerin seçilmesi halinde, doğru mühendislik standartlarına ters düşülecek ve gereksiz yere sınırlı bütçenin tüketilmesi durumu ortaya çıkacaktır [9].

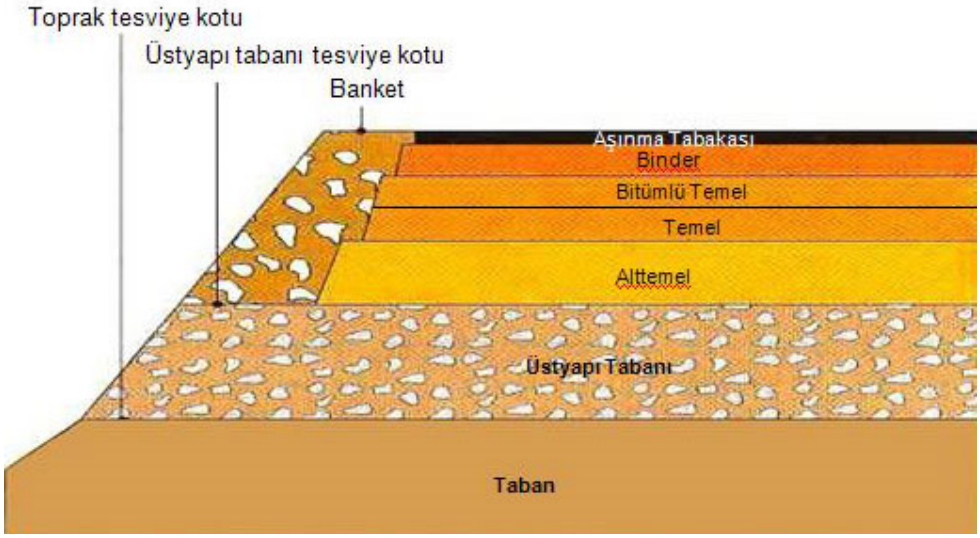
Bir karayolu üstyapısı, trafiği güvenli olarak ve ekonomik bir şekilde taşımak zorundadır. Araç tekerleği ile üstyapı yüzeyi arasındaki sürtünmeyle güvenli olarak taşıma sağlanır. Ekonomi ise yapım sırasında kullanılan malzemelerle, işletme ve taşıt maliyetleri ile ilgilidir.

Bir esnek üstyapı, kaplama tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakalarından oluşur ve üstyapının üst kısmından taban zeminine inildikçe, tabakalarda kullanılan malzemelerin fizik ve mekanik özellikleri, kaliteleri düşer. Bu tabakaların kalınlıklarını belirleyen ölçütler proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zemini dayanımı gibi ölçütler göz önünde bulundurulmaktadır. Bir esnek üstyapıda en üstteki tabaka kaplama tabakasıdır. Bu tabaka aşınma ve binder olarak iki kısımda oluşur. Bu tabakanın trafiği emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir. Ayrıca aşınma tabakalarının, taşıtlardan su sıçramasını ve yol yüzeyindeki küçük havuzcukların oluşmasını önlemek için drenaj tesislerine de sahip olması gereklidir. Aşınma tabakasında binder tabakasına göre daha ince malzeme kullanılır [10].

Aşınma tabakasının altında, üstyapının oturduğu doğal zemin olan taban zeminin koruyan temel tabakası bulunur. Temel tabakası bir veya birden fazla tabakadan oluşabilir. Temel tabakasının asıl görevi taşıtların geçişlerinden dolayı gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitüm bağlayıcılı karışım, stabilize edilmiş veya dikkatle seçilmiş granüler malzeme olabilir. Trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Esnek üstyapı tabakaları aşınma tabakası, binder tabakası, temel ve alttemel tabakasından oluşmaktadır bu tabakalar Şekil 2.2'de gösterilmiştir [12]. Şekil 2.3'te ise bir esnek üst yapının enkesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Bitümlü kaplama kesiti [41].



Şekil 2.3 : Esnek üstyapının enine kesiti [41].

2.2.1 Taban zemini

Taban zemini sıkıştırılmış doğal zeminden oluşur. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir. Bu zeminin esas görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyaç vardır [7].

Taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 150 cm altında tutulmalı, bununda sağlanması için uygun yeraltı drenajı yapılmalıdır. Ayrıca uygun drenaj sistemi ile yüzey suyunun yol gövdesini etkilemesi önlenmelidir [13]. Yarma veya dolgu her türlü zemin ilgili şartnameye göre sıkıştırılıp şekillendirilir. Üstyapı kalınlığının belirlenmesinde taban zemini başlıca faktör olmakla birlikte don etkisinden kaynaklanan bozulmalarda hesaba katılması gereken bir diğer konudur. Zemin sağlamlığımda CBR ölçeğine göre değerlendirilir [14]. Don olayının yol

üstyapısına olan etkisinin azaltılabilmesi için aşağıdaki faktörlerin incelenmesi gerekir;

- Taban zeminin dona karşı hassasiyeti
- Üstyapının toplam kalınlığı
- Donma indeksi
- Yeraltı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği
- Güzergahtaki yarma ve dolgu yükseklikleri [13].

2.2.2 Alttemel tabakası

Esnek üstyapılarda taban zemininin üstüne inşaat edilen düşük elastisite modülüne sahip tabakadır. Bu tabakanın görevi üst tabakalardan gelen trafik yüklerini taban zeminine uniform olarak iletmektir. Bunun yanı sıra taban zemininde bulunan suların ıslahını sağlamak, kış aylarında don olayını önlemek, temel tabakasını elverişli yüzey oluşturmak ve üst tabakalardaki malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini korumaktır.

2.2.3 Temel tabakası

Temel tabakası, trafik yüklerini alt tabakalara iletmek, üstyapının stabilitesini artırmak, drenajı sağlamak, alt tabakaları don olayının olumsuz etkilerinden korumak, düzgün taşıma yüzeyi elde etmek, çalışma platformu oluşturmak, üstyapının taşıma gücünü artırmak ve rijit üstyapıda pompaj hasarını önlemek amacıyla temel tabakası inşa edilir. Bu anlamda temel tabakası üstyapının yapısal anlamda başlıca tabakasıdır [15]. Karayollarında üç farklı temel tipi uygulanmaktadır;

- Granüler temel (GT)
- Plent-Miks temel (PMT)
- Çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT) [16]

Bitümlü temel tabakası karayollarının verileri baz alınarak tasarlanan, 10 - 20 cm kalınlığında değişim gösterebilen, çoğunlukla granüler temel üzerine gradasyonu sağlanmış, döküm esnasında karışım sıcaklığının 140 – 155 ^{0}C arasında, zemin sıcaklığının ise 135 - 142 ^{0}C olması istenilen, bitümlü sıcak karışımın uygulandığı tabakadır. Yoğun trafik yüküne maruz kalacak yollarda, yolun taşıma gücünü

arttırmak için bitümlü temel kalınlığını arttırmak bir çözüm olabilir. Şekil 2.4'te bitümlü temelin sıkıştırılması gösterilmektedir.

Şekil 2.4 : Bitümlü temelin sıkıştırılması [56].

2.2.4 Kaplama tabakası

Kaplama tabakası, planlanan trafik yüklerini taşımak, kaymaya, trafiğin aşındırma ve iklim koşullarının ayrıştırıcı etkisine karşı koymak, seyahat konforu ve su yalıtımı sağlamaktır [17]. Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça yolun trafik yüklerine karşı direnci artar. Temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmeleri azalır. Yollarda temel tabakası üzerine koyulan bitümlü kaplama tabakaları, genellikle yapım ve çalışma ilkeleri birbirinden farklı tiplerde yapılır [16]. Üstyapının en üst tabakası olup genellikle;

- Asfalt betonu
- Sathi kaplama olarak inşa edilir [17]

2.3 Kompozit Üstyapı

Kompozit üstyapı yani diğer bir adıyla yarı rijit üstyapı, karayolu üstyapısında deforme olmuş esnek üstyapıya beton takviyesi ile güçlendirilmesi veya deforme olmuş rijit üstyapının bitümlü sıcak karışımla onarılması sonucu elde edilir. Kompozit üstyapılar maliyeti yüksek olduğundan dolayı pek tercih edilmez.

Yoğun otoyol çalışmalarının olduğu 1980'li yıllarda ülkemiz otoyollarda kompozit üstyapı tipi kullanılarak asfalt kaplama tabakalarının altında temel olarak çimento bağlayıcılı karışımlar kullanılmıştır. Ancak bu uygulamanın yapıldığı yol kesimlerinde, yapımdan hemen sonra çimentodan kaynaklanan enine büzülme çatlakları oluşmuş ve kaplama üzerine yansımıştır. Onarımı zor olan bu bozukluklar nedeniyle otoyollarda kompozit üstyapı tekniğinden vazgeçilmiştir [18].

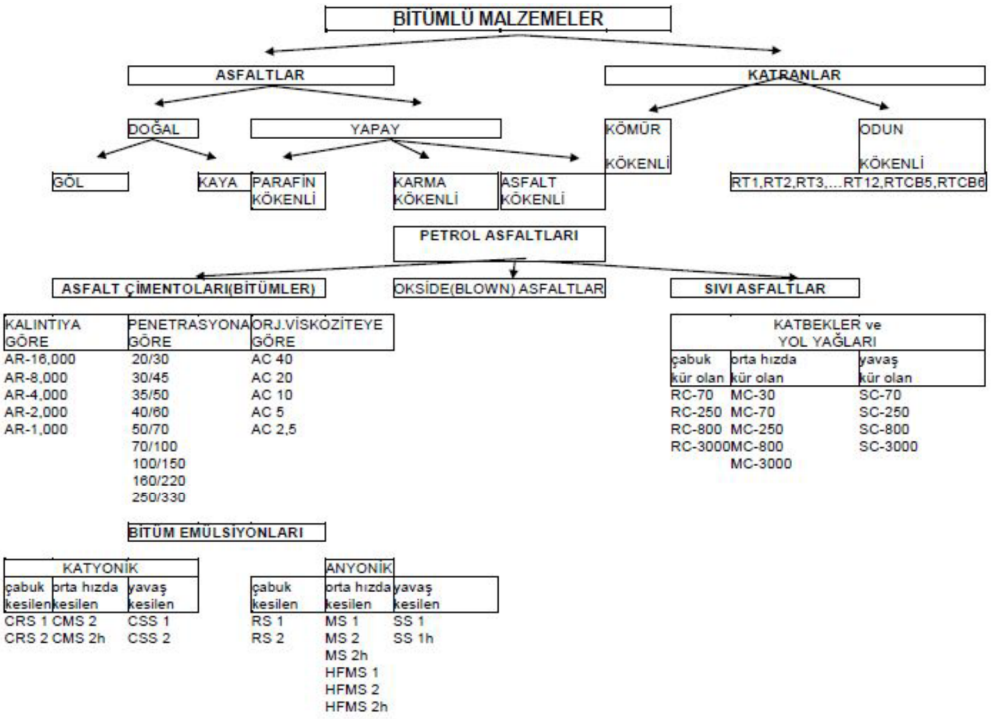
3. ESNEK ÜSTYAPIDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

3.1 Bitümlü Bağlayacılar

Bitüm, ham petrolün rafinelerde damıtılması sonucu üretilen yol yapımında ve yol bakımında kullanılan viskoz bir bağlayıcı malzemedir. Asfalt çimentosu olarak da bilinir. TS EN 12591'e göre yol kaplamasında kullanılan bitümün B 40/60, B50/70, B 70/100, B 100/150 ve B 160/220 olmak üzere TS 118 EN 1426 şartnamesine göre penetrasyon iğnesinin belli yük altında ve sürede, şartnamede belirlenen sıcaklıktaki bitüm numunesine dikey olarak batırılarak iğnenin batma derinliği cinsinden belirlenen beş adet penetrasyon sınıfı bulunmaktadır. Şekil 3.1'de penetrasyon ölçüm cihazı gösterilmektedir.

Şekil 3.1 : Penetrasyon ölçüm cihazı [57].

Asfaltlar ise doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar diye iki gruba ayrılabilir (Şekil 3.2). Doğal asfaltlar, mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise, ham petrolün arıtılmasından elde edilir. Katran, başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Arıtıldıktan sonra kullanılır. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilmektedir [19].



Şekil 3.2: Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması [17].

Günümüzde yol inşaatlarında, daha ucuz inşaat edilebilmesi nedeniyle, büyük oranda petrolün damıtılması ile elde edilen bitümler kullanılmaktadır. Hava şartları, trafik yükü ve zemin şartlarına göre kullanılacak bitümler belirli kimyasal maddelerle karıştırılabilir. Böylelikle çeşitli amaçlara yönelik değişik asfalt türleri üretilebilir [10].

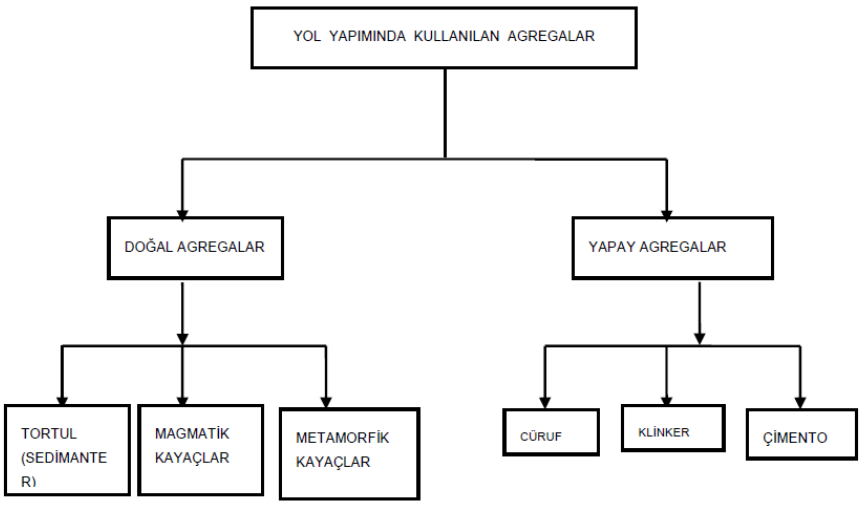
3.2 Agregalar

Bitümlü sıcak karışımlarda ağırlık ve yüzde olarak en çok bulunan malzeme agregadır. Yol üst yapısında agregalar taşıyıcı iskeleti oluştururlar ve yola etkiyen yüklerden doğan gerilmeleri taşırlar. Bu sebepten zemin ve çevre şartlarına uygun davranacak, yolda oluşacak yükleri taşıyabilecek durumda olmalıdırlar. Yol üst yapısında kullanılacak agregaların yol projelendirilme esnasında belirli özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yol üst yapısında kullanılmak istenen agregaların kullanılacak tabakaya göre belirli şartları sağlamaları ve kullanılacak tabakalara göre şartnamede belirtilen gradasyonu sağlamaları istenir.

Bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının tamamı, BSK'ın ise agrega miktarı genellikle ağırlıkça % 93 - 97, hacimce % 75 - 90 arasındadır. Mineral agrega esas olarak kaplamanın yük taşıma kapasitesinden sorumlu olup, buna bağlı olarak asfalt

kaplamasının performansı büyük oranda agregaya bağlıdır. Agreganın tipi, yüzey pürüzlülüğü, yassılık durumu, gradasyonu gibi özellikleri BSK'ın yorulma ve tekerlek izi açısından performansları üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Kaplama tabakası, etkiyen yüklerin tesiri altında farklı deformasyonlara maruz kalır.

Tabakanın yapımında kullanılan malzemeler, uygulanan yapım metotları ve yapım sonrası maruz kalınan dış yükler kaplamanın performansını etkileyen başlıca faktörlerdir. Bir kaplamanın direnci ve yoğunluğu üzerine etki eden en önemli faktör agregadır. Bu bakımdan agregaların sert ve dayanıklı olması, bünyelerinde zararlı maddeler bulunmaması ve yüzey şekillerinin bir kenetlenme yaparak direnci artıracak şekilde olması arzu edilir [19]. Yol yapımında kullanılan agregaların türleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir [20].



Şekil 3.3 : Yol yapımında kullanılan agregalar [20].

3.2.1 Alttemel tabakasında agrega kullanımı

Tesviye yüzeyi üzerine serilen ve taban yüzeyi ile temel tabakası arasında yer alan genellikle belli bir granülometrisi olan ve incesi az, kum, çakıl, yüksek fırın cürufu gibi daneli granüler malzemeden oluşan tabakadır. Kaplama ve temel tabakasından gelen trafik yükü etkisini taban zemini üzerine yayılmasında temel tabakasına yardımcı eleman olarak yer almakta ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge vazifesi görmektedir [20].

Alttemel malzemesi, Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen ve AASHTO T-27, T-11 veya TS 1900 standartlarında belirtilen yöntemler ile bulunan granülometri,

Çizelge 3.1'de verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır. Alt temel malzemesi fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [22].

Çizelge 3.1 : Alttemel tabakasının granülometri limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %	
	Tip - A	Tip - B
75	100	-
50	-	100
37,5	85 - 100	80 -100
25	-	60 -90
19	70 - 100	-
9,5	45- 80	30 - 70
4,75	30 -75	25 - 60
2	-	15 - 40
0,425	10 - 25	10 - 20
0,075	0 - 12	0 - 12

Çizelge 3.2 : Alttemel tabakasının fiziksel özellikleri [22].

Deney	Limit Değer	Deney Standardı
Hava tesirine karşı dayanıklılık (donma) deneyi ile maksimum kayıp %	20	TS – 3655, AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	50	TS – 3694, AASHTO T-96
Likit limit maksimum %	25	TS – 3655, AASHTO T-89
Plastite indeksi maksimum %	6	TS – 1900, AASHTO T-90
Kil topakları ve dağılabilen tane oranı maksimum %	2	ASTM C-142
Organik madde %	1	AASHTO T-194

Alttemelin sıkıştırma kriterleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Sıkıştırmada, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük, iki frekanaslı vibrasyon düz bandajlı silindirler veya lastik başına düşen yükü, en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılacaktır. Kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun olan sıkıştırma tekniği işin başında bir deneme kesimi yapılarak belirlenecektir. Deneme kesimi en az üç silindirme kesitinden oluşacak ve 100 m'den az olmayacaktır.

Sıkıştırma yolun eksenine paralel olarak yapılacak, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kayacaktır. Yatay kurblarda, kurbun içinden başlayacak ve dışına doğru devam edecektir. Her geçişte bir önceki kısma, silindir geçişinde %10 bindirme yapılacaktır [22].

Çizelge 3.3 : Alttemel tabakasının sıkıştırma kriterleri [22].

Tip – A	Sıkıştırma Maksimum % Optimum Su İçeriği %	95 Wopt ± 2	Modifiye Proktor TS 1900, AASHTO T-180
Tip – B	Sıkıştırma Maksimum % Optimum Su İçeriği %	97 (Wopt ± 2) - Wopt	Modifiye Proktor TS 1900, AASHTO T-180

3.2.2 Temel tabakasında agrega kullanımı

Temel tabakası;

- Granüler temel
- Plent-miks temel
- Çimento bağlayıcılı stabilize temel

Olmak üzere üç farklı türde inşa edilmektedir.

Temel tabakasının, Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen kaba agrega için fiziksel özellikleri ve ince agrega için fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4'te ve Çizelge 3.5'te gösterilmiştir [22].

Çizelge 3.4 : Temel tabakasının kaba agreganın fiziksel özellikleri [22].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava Tesirine Karşı Dayanıklılık (Donma) deneyinde MgSO4 ile kayıp %	< 20	TS EN 1367-2
Aşınma Kaybı (Los Angeles) %	< 35	TS EN 1097-2
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	< 1	ASTM C-142
Organik Madde, %	Negatif	TS EN 1744-1
Su Emme Oranı, %	< 3,0	TS EN 1097-6
Yassılık İndeksi, %	< 30	BS 812

Çizelge 3.5 : Temel tabakasının ince agreganın fiziksel özellikleri [22].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Likit Limit, %	Normal Performans	TS EN 1900-1
Plastiste İndeksi, %	Normal Performans	TS EN 1900-1
Organik Madde, %	Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi	< 4,5	TS EN 933-3

Granüler temel, Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen granülometri, Çizelge 3.6'da verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır.

Çizelge 3.6 : Granüler temel tabakasının granülometri limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %		
	Tip - A	Tip - B	Tip - C
50	100	-	-
37,5	80 - 100	100	-
25	60 - 90	70 - 100	100
19	45 - 80	60 - 92	75 - 100
9,5	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4,75	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2,00	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0,425	8 – 20	10 - 25	12 - 30
0,075	2 – 8	0 - 12	0 - 12

Granüler temelin sıkıştırma kriterleri Çizelge 3.7‘de gösterilmiştir. Sıkıştırmada, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük, iki frekanaslı vibrasyondüz bandajlı silindirler veya lastik başına düşen yükü, en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılacaktır. Kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun olan sıkıştırma tekniği işin başında bir deneme kesimi yapılarak belirlenecektir. Deneme kesimi en az üç silindirme kesitinden oluşacak ve 100 m’den az olmayacaktır.

Sıkıştırma yolun eksenine paralel olarak yapılacak, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kayacaktır. Yatay kurblarda, kurbun içinden başlayacak ve dışına doğru devam edecektir. Her geçişte bir önceki kısma, silindir geçişinde %10 bindirme yapılacaktır [22].

Çizelge 3.7 : Granüler temel tabakasının sıkıştırma kriterleri [22].

Minimum Sıkıştırma, %	95	TS EN 1900-1
Optimum Su İçeriği, %	(Wopt ± 2) - Wopt	Modifiye Proctor, Titreşimli Tokmak

Plent-miks temel, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilen granülometri, Çizelge 3.8'de verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır.

Çizelge 3.8 : Plent-miks temel tabakasının granülometri limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	**Geçen %**	
	Tip - I	**Tip - II**
37,5	100	-
25	72 - 100	100
19	60- 92	80 - 100
9,5	40- 75	50 - 82
4,75	30 - 60	35 - 65
2,00	20 - 45	23 - 50
0,425	8 - 25	12 - 30
0,075	0 - 10	2 - 12

Plent-miks temelin sıkıştırma kriterleri Çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Sıkıştırmada, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük, iki frekanaslı vibrasyondüz bandajlı silindirler veya lastik başına düşen yükü, en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılacaktır.

Sıkıştırma yolun eksenine paralel olarak yapılacak, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kayacaktır. Yatay kurblarda, kurbun içinden başlayacak ve dışına doğru devam edecektir [22].

Çizelge 3.9 : Plent-miks temel tabakasının sıkıştırma kriterleri [22].

Minimum Sıkıştırma, %	100	TS EN 1900-1
Optimum Su İçeriği, %	(Wopt ± 2) - Wopt	Modifiye Proctor, Titreşimli Tokmak

Çimento bağlayıcılı stabilize temel, Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen granülometri, Çizelge 3.10'de verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır.

Çizelge 3.10 : Çimento bağlayıcılı stabilize temel tabakasının granülometri limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %
37,5	100
25	72 - 100
19	60 - 92
9,5	40 - 75
4,75	30 - 60
2,00	20 - 45
0,425	8- 25
0,075	0 - 10

Çimento bağlayıcılı stabilize temelin sıkıştırma kriterleri Çizelge 3.11'de gösterilmiştir. Sıkıştırmada, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük, iki frekanaslı vibrasyonlu düz bandajlı silindirler veya lastik başına düşen yükü, en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılacaktır.

Sıkıştırılmış çimento bağlayıcılı granüler temel kalınlığı projede gösterilen kalınlığın %10'unda farklı olursa gerekli düzenleme aşağıdaki şekilde yapılacaktır.

1. Söz konusu düzenleme, karışımın hazırlanmasından sonra 2 saat içerisinde yapılacaksa, malzeme yüzeyi en az 5 cm kabartılacak ve gerekli azaltma veya gerekli karışımlar eklenerek sıkıştırılacak.
2. Eğer düzenleme 2 saati aşan bir süre sonunda yapılacaksa, mevcut malzeme tüm tabaka kalınlığı boyunca kaldırılıp, yeni bir karışımla projede gösterilen kalınlığın %10'unu aşmıyacak şekilde tekrar serilip sıkıştırılır [22].

Çizelge 3.11 : Çimento bağlayıcılı stabilize temel tabakasının sıkıştırma kriterleri [22].

Minimum Sıkıştırma, %	100	TS EN 1900-1
Optimum Su İçeriği, %	(Wopt ± 2) - Wopt	Modifiye Proctor, Titreşimli Tokmak

3.2.3 Kaplama tabakasında agrega kullanımı

Binder tabakası için gradasyon limitleri Çizelge 3.12'de gösterilmiştir. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri Çizelge 3.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.12 : Binder tabakası için gradasyon limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %
25	100
19	80 - 100
12,5	58 - 80
9,5	48 - 70
4,75	30 - 52
2,00	20 - 40
0,425	8 - 22
0,180	5 - 14
0,075	2 - 7

Çizelge 3.13 : Aşınma tabakası için gradasyon limitleri [22].

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %		
	Tip-1	Tip-2	Tip-3
19	100	-	-
12,5	88 - 100	100	100
9,5	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6	-	-	25 - 33
4,75	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2,00	25 - 35	35 - 53	20 - 27
0,425	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0,180	7 - 14	8 - 16	-
0,075	3 - 8	4 - 8	7 - 11

Kaplama tabakası için kaba ve ince agreganın fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'te gösterilmiştir.

Kaplamanın sıkıştırılması yol serildikten hemen sonra sıkıştırma işlemine başlanacaktır. Silindiraj başladığında karışımın sıcaklığı 130 ºC'nin altında olmayacak ve karışımın sıcaklığı 80 ºC'nin altına düşmeden sıkıştırma işlemi tamamlanmış olacaktır.

Karıştırma işleminde statik ağırlığı 8 – 12 ton arasında demir bandajlı silindirler ile lastik basıncı ayarlanabilen kendinden yürür lastik tekerlekli silindirilen kullanılacaktır.

Silindiraj sonunda yol yüzeyinde taş kırılmaları, kaymalar, çatlamalar ve yırtılmalar olmayacaktır [22].

Çizelge 3.14 : Kaplama tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri [22].

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Aşınma Kaybı (Los Angeles) %	<30	<27	TS EN 1097-2
Hava Tesirine Karşı Dayanıklılık (Donma), %	<25	< 20	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, Ağırlıkça, %	>95	>95	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	<30	<25	BS 812
Cilalanma Değeri, %	>35	>50	TS EN 1097-8
Su Emme Oranı, %	<2,5	<2,0	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, %	>60	>60	TS EN 12697-11
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	<0,3	<0,3	ASTM C-142

Çizelge 3.15 : Kaplama tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri [22].

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Plastiste İndeksi, %	Normal Performans	Normal Performans	TS EN 1900-1
Organik Madde, %	Negatif	Negatif	TS EN 1744-1
Su Emme, %	<2,5	<2,0	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi	<3,0	<3,0	TS EN 933-9

4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ

4.1 Demir Çelik Sektörü

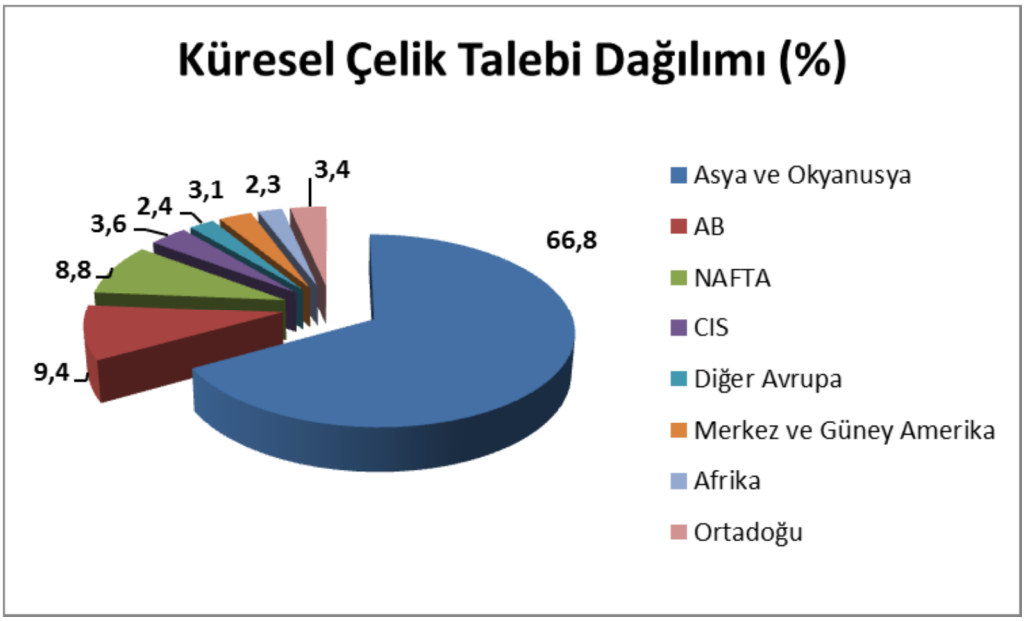
Demir çelik sektörü esas itibarıyla; demir cevherinin yüksek fırınlarda veya hurdaların ark fırınlarından eritilmesiyle elde edilen değişik kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip ürünler üreten bir sektördür [23]. Değişen tüketici ihtiyaçları, teknolojide görülen gelişmeler ve rekabet gibi unsurlar demir çelik sektöründeki ürün çeşitliliğini daha da arttırmaktadır. Ağır sanayi sektörlerinden en önemlisi olan demir çelik sektörü, inşaat, altyapı, otomotiv, beyaz eşya ve makine sanayi gibi pek çok önemli endüstriye hammadde sağlamaktadır. Bu nedenle bir ülkenin sanayileşmesi güçlü bir demir çelik sektörüne ve tüketimine sahip olmasıyla doğrudan ilişkilidir [24].

Dünya çelik üretimi, 1998-2008 yılları arasındaki 10 yıllık dönemde, istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. Özellikle 2000'li yıllardan itibaren, dünya çelik üretimindeki artışın Çin Halk Cumhuriyeti kaynaklı olarak şekillendiği görülmektedir. 2000-2007 döneminde, dünya çelik üretimi yüzde 58,8 oranında artışla, 848 milyon tondan, 1 milyar 347 milyon tona ulaşmıştır. Aynı dönemde, Çin'in çelik üretiminin, yüzde 280 oranında artışla, 129 milyon tondan 490 milyon tona ulaşması, dünya çelik üretiminde gerçekleşen 499 milyon tonluk artışın 361 milyon tonuna tekabül eden yüzde 72'sinin Çin'den kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Çin hariç tutulduğunda, dünya çelik üretimindeki artış yalnızca yüzde 19 seviyesinde kalmıştır [25].

2015-2017 yılları arasında dünya çapında sektör oyuncuları küresel bir arz fazlası tahmin etmektedirler. Üretimde artışın devamına karşılık en büyük tüketici Çin'in bu üretim artışını karşılayacak şekilde bir büyüme gerçekleştirmesinin beklenmemesi de arz fazlası beklentisini doğrulamaktadır. Çelik tarafında da, WSA [26] verilerine göre 2014/10 döneminde toplam üretimin %98'ini gerçekleştiren 65 ülkede 1,36 milyar ton (%3,5 düzeyinde bir artışa işaret etmektedir) üretim gerçekleştirildiği, bunun %50'sinin Çin'den, %6'sının Japonya'dan ve %5'inin ABD'den

gerçekleştiğini görmekteyiz ki bu durum da Çin ekonomisinde gelişmelerin sektör ve fiyatlar açısından belirleyici durumunu ortaya koymaktadır. 2015 yılında talebin AB'de %2,9, Asya ve Okyanusya'da %1,4, Ortadoğu'da %6, NAFTA'da %2,2 artması ve bu şekilde küresel talebin %2 artışla 1.594 milyon ton olması beklenmektedir [26].

Grafik 4.1 : Küresel çelik talebi dağılımı (%) [26].



OECD ise 2015-2020 yılları arasında otomotiv sektörünün çelik talebinin ivme kaybetmesini ve 2025 yılına dek 3 sektörün küresel çelik talebinin yüzde 90'ını oluşturmasını beklemektedir;

1. Yapı ve İnşaat (Gelişen ülkelerde konut ve altyapı harcamaları) : %68
2. Mekanik/Mühendislik : %13
3. Enerji Taşımacılığı (Boru hattı, tüpler vs.): %9

Küresel çapta demir çelik sektöründe arz, talep ve düşük seyretmekte olan hammadde fiyatları üzerinde;

- Küresel büyüme hızı,
- Çin ekonomisinde yeniden dengelenme süreci
- Çin'de para politikası ve konut sektörü performansı,

Türk demir-çelik sektörünün 2014 görünümü ve 2015 beklentilerine geçildiğinde ise; Büyük üreticilerin kapasite artırımı, Çin'de yeniden dengelenme süreci ve küresel ekonomide zayıf toparlanma ile hammadde (demir cevheri) fiyatları düşerken yıl

genelinde hurda fiyatları ise yüksek seyrini korumuş ve bu nedenle de üreticiler arası maliyet farkı entegre tesisler lehine açılmıştır. Bu şekilde dünya çelik üretimindeki payı %2 olan Türk demir çelik sektöründe 2014 yılı Ocak-Ekim döneminde toplam üretim yıllık bazda %0,9 düşüşle 28,4 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Entegre tesisler ilgili dönemde üretimlerini yüzde 5 oranında artırırken elektrik ark ocaklı tesislerin üretiminin %3,2 düşüşle 19,9 milyon tona düşmesi toplam üretim gerilemesindeki temel neden olmuştur [27].

Dünya ham çelik üretimi sürekli bir artış eğilimi içinde bulunmaktadır. Çizelge 4.1'de 2002-2014 döneminde Dünya'daki ve Türkiye'deki ham çelik üretim miktarları gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, dünyada ham çelik üretimi 2014 yılında, 2010 yılına göre yaklaşık %14,5'lik bir artış göstermiştir. Türkiye'de ise aynı dönemde %17,2'lük bir artış görülmüştür.

Çizelge 4.2'de ise, 2014 yılına göre dünya ham çelik üretiminde ilk 10 sırayı alan ülkeler gösterilmiştir. Ayrıca bu ülkelerin 2010 ve 2014 yıllarına ait ham çelik üretimleri ve bu yıllar arasındaki değişim oranları gösterilmiştir.

Türkiye, 2014 yılının ilk on ayında 34 milyon ton ham çelik üretimiyle dünyanın en büyük ham çelik üreticileri arasında 8'inci sırada yer almıştır. Ayrıca, Türkiye, dünya ham çelik üretiminin %2,4'lük bölümünü gerçekleştirmekte olup, 2010 - 2014 yılları arasında ilk 10 ülke içinde en büyük üretim artışını gerçekleştiren 4’üncü ülke olmuştur [26].

Çizelge 4.1: Yıllık ham çelik üretim miktarı [26].

Yıl	Dünya Üretim (Milyon Ton)	Türkiye Üretim (Milyon Ton)
2002	904	16
2003	970	18
2004	1071	20
2005	1144	21
2006	1247	23
2007	1347	26
2008	1329	27
2009	1232	25
2010	1428	29
2011	1490	34
2012	1510	36
2013	1649	35
2014	1636*	34

* Toplam üretimin %98'ini oluşturan 65 ülkenin toplamı

Çizelge 4.2: Ham çelik üretici ülkeler ve üretim miktarları [26].

		Üretim (Milyon Ton)		Değişim
Sıra	Ülke	2010	2014	(%)
1	Çin	637,4	822,7	29,07
2	Japonya	109,6	110,7	1,01
3	ABD	80,5	88,3	9,69
4	Hindistan	68,3	83,2	21,81
5	Rusya	66,9	70,6	5,53
6	Güney Kore	58,9	71,1	20,71
7	Almanya	43,8	42,9	-2,05
8	Türkiye	29,1	34	17,18
9	Brezilya	32,9	33,9	3,04
10	Ukrayna	33,4	27,2	-18,56

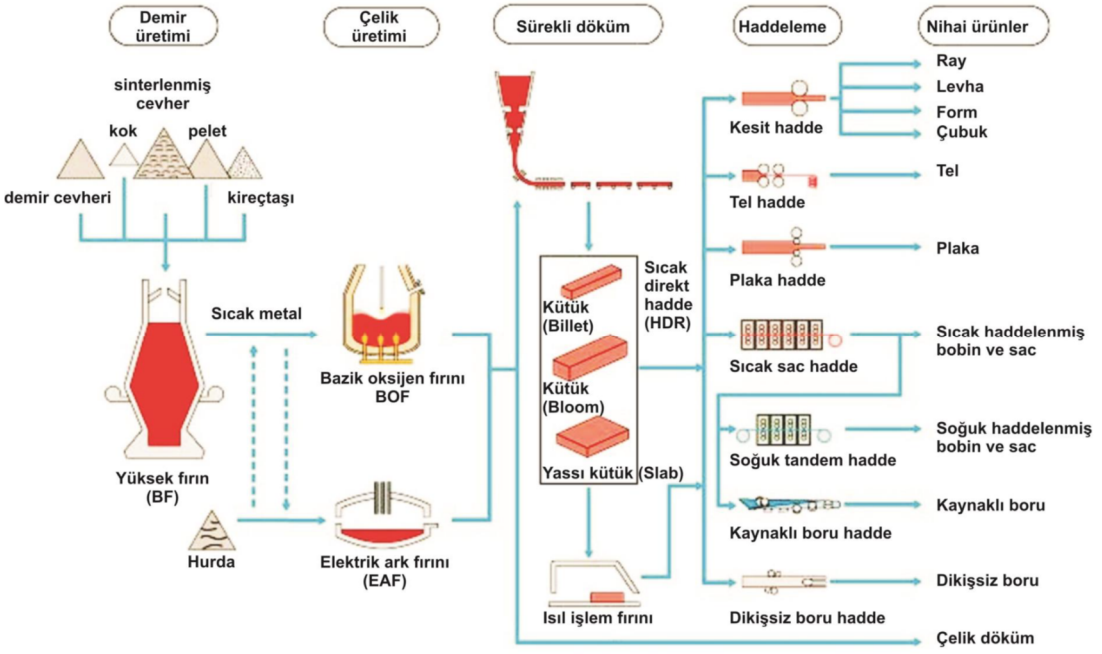
4.2 Demir Çelik Üretimi

Demir-çelik ürünleri üretimi için kullanılan iki sistemden biri, demir cevherinden ham demir ve ham demirden çelik üretimi yöntemi, diğeri ise çelik hurdasından çelik üretimi yöntemidir. Entegre tesislerde demir-çelik üretim süreci, demir cevherinin kırma, eleme işlemleri sonucunda hazırlanması veya parça cevherin doğrudan doğruya yüksek fırına şarjı ile başlamaktadır. Yüksek fırınlarda kok kömürünün

yardımı ile demir oksit haline gelen cevherin oksijeni alınarak indirgenmekte ve sıvı ham demir elde edilmektedir. Bunun için farklı çelik üretim metotları bulunmaktadır. Bessemer – Thomas çelik üretim metodu ve Siemens - Martin çelik üretim metodunun yanı sıra en çok kullanılanları;

- Yüksek Fırın ile demir – Bazik Oksijen Fırını ile cevher bazlı çelik üretimi (BOF)
- Elektrik Ark Fırını ile hurda bazlı çelik üretimi (EAF) [28]

Şekil 4.1' de bir bütünleşmiş çelik tesisinde üretim akışı görülmektedir. Elektrik ark fırınları soğuk hurdadan çelik üretimi yapabildiğinden Yüksek Fırın tesisine entegre olmadan bağımsız çalışabilir [29].



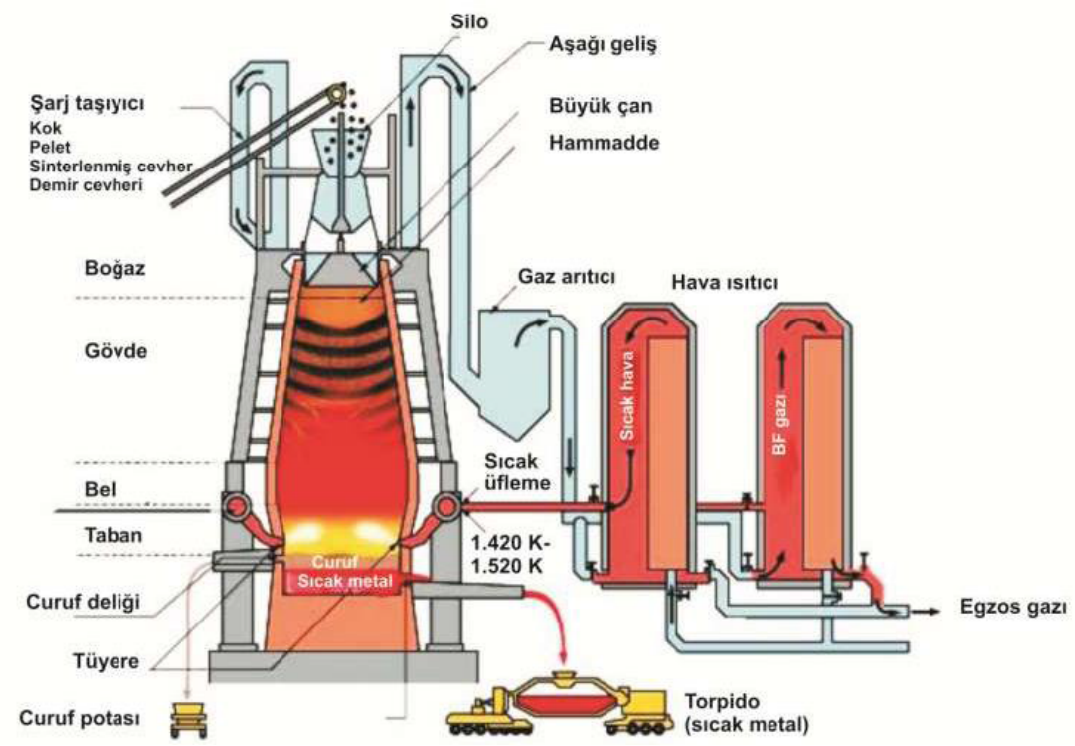
Şekil 4.1 : Bir entegre çelik tesisinde üretim akışı [29].

4.2.1 Yüksek Fırın

Kok kömürüne dayalı ilk gerçek yüksek fırın 1735 yılında yapılmıştır. Yüksek fırınlar pik demir üretiminde açık ara farkla en önemli süreçtir. Bu teknik pik demir üretimindeki yerini önümüzdeki 20 yılda da koruyacak gibi görünmektedir. Demir içeren hammaddelerin kok ve kireç taşı ile bir arada ergitilmesinde kullanılan ve yükseklikleri 30 - 90 m arasında değişen fırınlara yüksek fırın denir. Şekil 4.2'de 2 yüksek fırının genel görünümü verilmiştir. [31].

Yüksek fırının iç hacmi 250 - 850 m^3 kadardır. Ortalama 1 m^3 fırın hacmi için 24 saatte 0,5 ila 1,4 ton arası ham demir elde edilir. 1 ton ham demir elde etmek için kömürün kalitesine, cevherin kompozisyonuna bağlı olarak 450 - 800 kg kok tüketilir. Bir yüksek fırından elde edilen ürün pik demir adını alır.

Yüksek fırın doldurulup yakıldıktan 10 - 15 saat kadar sonra eriyik ham demir alınmaya başlanır. Günde 4-6 kere eriyik alınır. Yüksek fırında kullanılan hammaddeler yaklaşık olarak %55 – 60 oranında sinter, %30-35 oranında cevher %10-15 pelettir. Pik demirde %92 - 93 demir vardır. Geri kalan ise C, Si, Mn, P, S gibi elementlerdir [31].



Şekil 4.2 : Yüksek fırın [31].

4.2.2 Bazik oksijen fırını (BOF)

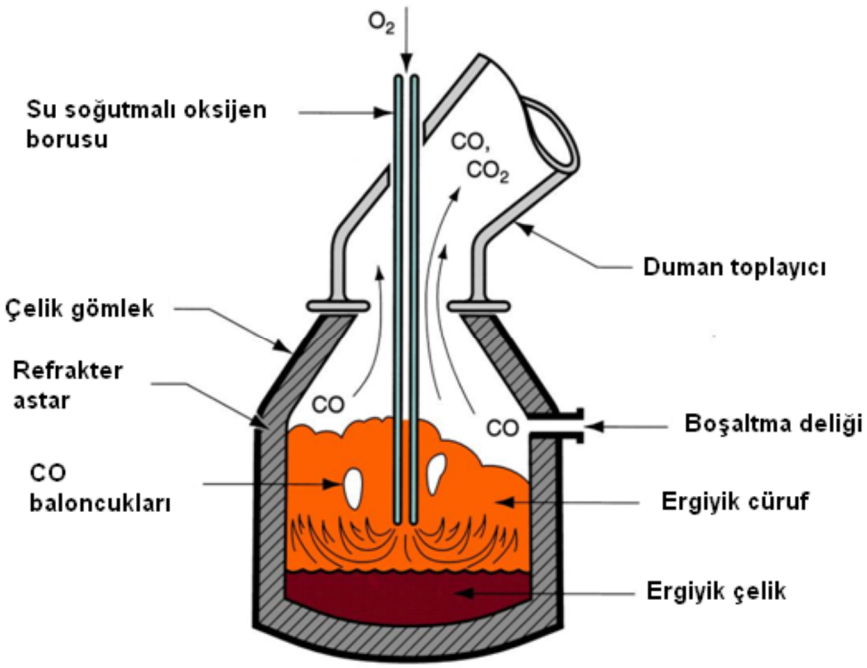
Çelik üretimindeki ilk modern anlamdaki uygulamalar 1850'lerdeki Bessemer uygulamaları ile başlamıştır. İlk başta bu uygulamalarda kullanılan konvertörlerin iç kısımlarında silika refrakter tuğlalar kullanılmıştır. 1879'larda Thomas fırın içerisini dolomitik tuğlalarla astarlayarak bazik cüruf oluşumunu sağlamıştır. 1970'li yıllarda konvertörün tabanından sıvı pik metale oksijen üflenmesi bu uygulamada önemli bir yenilik veya gelişme olarak tarihteki yerini almıştır. Konvertörün alt kısmındaki

birden fazla tüyerden üflenen saf ve basınçlı oksijenle konvertördeki sıvı metalin etkili bir şekilde karışımı ve buna bağlı olarak da homojen bir dönüşümü sağlanabilmiştir. Yine 1970'li yıllarda konvertörün tabanında sıvı pik metal içerisine karışım gaz gönderilmesi bu yöndeki gelişmelerin en son aşamasıdır [30].

Bazik oksijen fırınlarının kapasiteleri tipik olarak 250 ton kadardır. Bazik oksijen fırınlarında çelik üretimi yaklaşık 15 - 20 dakikada gerçekleştirilmektedir. 250 ton kapasitedeki bir BOF'nın yüksekliği 10,33 m, dış çapı 7,90 m, cidar kalınlığı 0,92 m ve çalışma hacmi 290 m3 kadardır. Fırına yüklenecek optimum sıvı metal ve hurda oranlarını, cüruf yapıcı katkı maddelerinin miktarını, fırına oksijen üfleyen lansın yüksekliğini ve üfleme zamanını bilgisayar otomatik olarak kontrol etmektedir.

Bazik oksijen fırınlarında, genellikle, %70-80 oranında yüksek fırından gelen sıvı metal ile kalan kısmını çelik hurdası, kireç taşı, dolomit ve deoksidantların oluşturduğu şarj kullanılır. Uygun döküm sıcaklığında istenilen karbon yüzdesine erişmek için konvertere şarj edilecek ham maddelerin cinslerinin ve miktarlarının ayarlanması gerekir. Fırın %100 sıcak metal ile şarj edilir ve oksijen ile üflenirse, sıcak metal içindeki karbon ve diğer yabancı elemanların oksijen ile birleşmesi sonucunda çok fazla ısı meydana geldiği için sonunda dökülemeyecek kadar sıcak bir çelik elde edilir. Bunu önlemek için konvertere soğutucu olarak hurda şarj edilir. Hurdanın erimesi karbon ve diğer yabancı elemanların yanması esnasında meydana gelir, Bu, elemanların oksijen ile yanması sonucu verdikleri ısıya bağlıdır. Konverter, %75 hurda ve %25 sıcak pik demir ile şarj edilirse sıcak metal içindeki karbon ve diğer elemanların oksijen ile yanması sırasında verdikleri ısı hurdanın yalnız küçük kısmını eritir. Bu bakımdan fırınların uygun miktarlarda sıcak pik demir, hurda veya cevher ile şarj edilmesi gerekir [31].

A.B.D.'deki çelik üretiminin %70'i BOF yöntemiyle gerçekleştirilir. BOF, Bessemer dönüştürücüsünün daha gelişmiş halidir. Bessemer işleminde ergimiş pik demirdeki istenmeyen elementleri oksitlemek için hava üflenirken, BOF işleminde saf oksijen kullanılır. Tipik BOF 5 m çapında olup, bir defada 150 - 200 tonu işleyebilir. Bazik oksijen fırının genel görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 : Bazik oksijen fırını [26].

Çelik üretim tesislerinde ergimiş pik demir yüksek fırından alınıp BOF'na taşınır. Hammadde olarak hurda demir-çelik de kullanılır. Ayrıca kireç (CaO) ilave edilir. Yüklemeden sonra saf oksijen borusu fırına daldırılır. Bu borunun alt ucu ergimiş demir yüzeyinin 1,5 m üzerinde olacak şekilde ayarlanır. Saf O_2 borudan yüksek hızda üflenir. Bu da ergimiş havuzun yüzeyinde yanma ve ısınmaya yol açar. Fazla C sıvı çelikten uzaklaşır; Si, Mn ve P gibi elementler oksitlenir. BOF'ndaki tepkimeler aşağıdaki şekildedir:

$2\ C + O_2 \rightarrow 2\ CO$ (ve bir miktar CO_2)

$Si + O \rightarrow SiO_2$

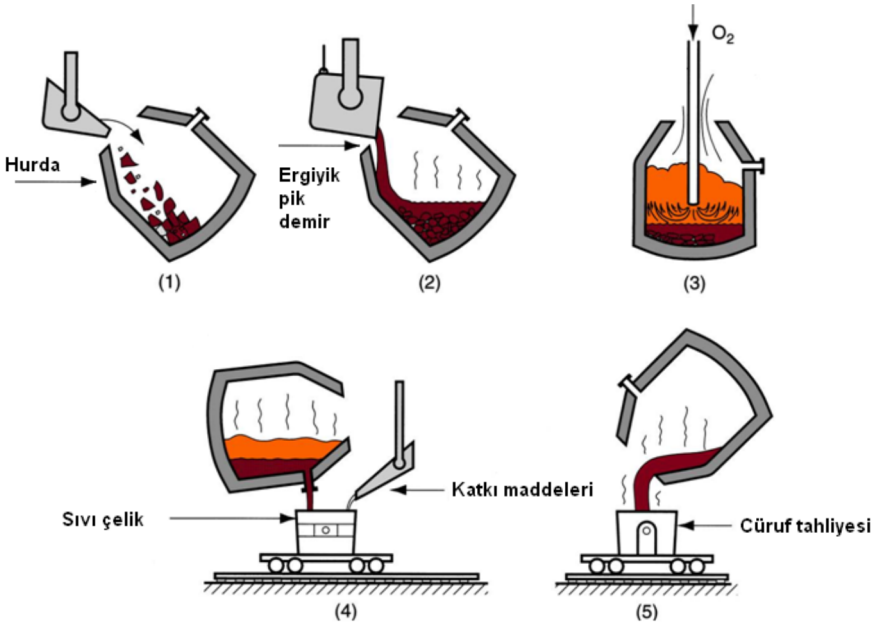
$2\ Mn + O_2 \rightarrow 2\ MnO$

$4\ P + 5\ O_2 \rightarrow 2\ P2O_5$

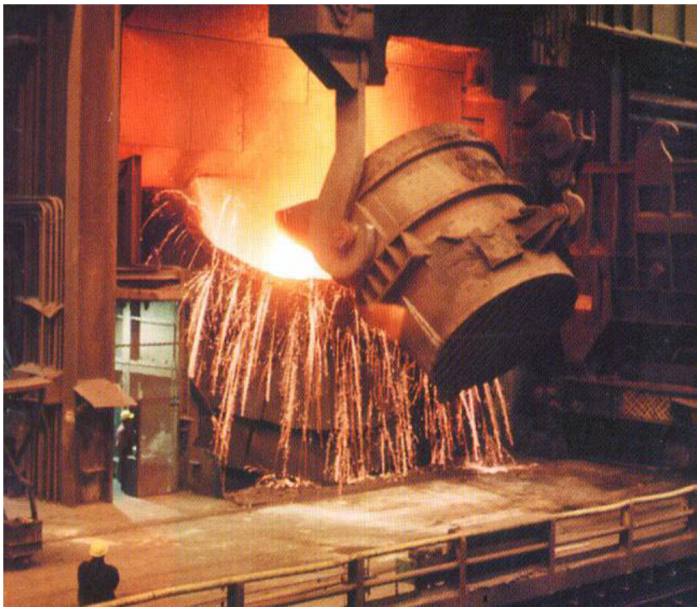
İlk tepkimede üretilen CO ve CO_2 üst taraftan dışarı atılır. Diğer 3 tepkimenin ürünleri cüruf olarak ergimiş çeliğin üzerinde birikir. Kireç, istenmeyen elementlerin cürufta toplanmasını sağlayarak temizleyici işlevi görür. İşlem esnasında demirdeki karbon içeriği zamanla yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde azalır. Bu da C seviyesinin çelikte daha iyi denetimini sağlar. Rafine işlemi bittikten sonra, ergimiş çelik alınır, alaşım elementleri ve bazı ilaveler ergimiş çeliğe katılır ve sonra da cüruf alınır. 200 ton çelik 20 dakikada işlenebilir. Tüm çevrim ise 45 dakika alır. Daha yeni BOF uygulamalarında oksijen üstten değil fırının altına yerleştirilen borulardan

üflenir. Bu, geleneksel BOF yöntemine göre daha iyi bir karışım sağlar, işlem süresini kısaltır (3 dakika kadar), karbonu daha düşük seviyelere çeker ve yüksek ürün sağlar.

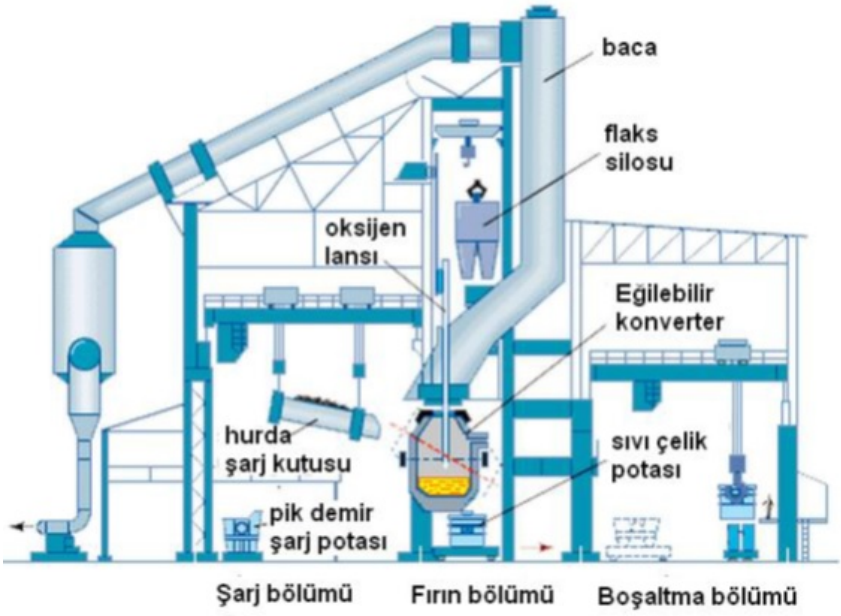
Şekil 4.4'te BOF yönteminin aşamaları; (1) hurda yüklemesi, (2) yüksek fırından gelen pik demir, (3) O2 üfleme, (4) sıvı çeliğin alınması, alaşım elementleri ve bazı ilavelerin katılması, (5) cürufun alınması şeklinde gösterilmiştir. Şekil 4.5'te ise, yüksek fırından gelen pik demirin BOF'na dökülmesi gösterilmektedir. Bazik oksijen fırını ve yardımcı bölümler Şekil 4.6' te verilmiştir [32].



Şekil 4.4 : BOF yönetim aşamaları [32].



Şekil 4.5 : Yüksek fırından gelen pik demirin BOF'na dökülmesi [32].



Şekil 4.6 : Bazik oksijen fırını ve ana ekipmanlar [31].

4.2.3 Elektrik ark fırını (EAF)

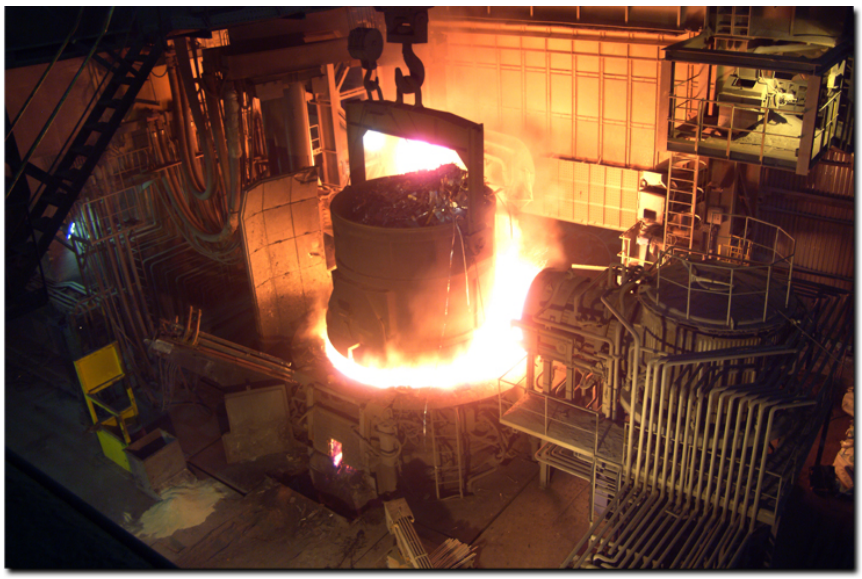
Hurda gibi demir içeren malzemelerin direkt ergitilmesi, modern çelik üretiminde, önemli bir rolü bulunan Elektrik Ark Fırınlarında (EAF) yapılmaktadır. Şu anda, Avrupa Birliği'nde (AB) Elektrik Ark Fırınlarında üretilen çeliğin toplam çelik üretimine oranı %35,3 tür. İtalya ve İspanya'da Elektrik Ark Fırını ile yapılan çelik üretimi, Yüksek Fırın-Bazik Oksijen Fırını yöntemi ile üretilen çelik üretiminden oldukça fazladır [33].

Elektrik ark fırını, demir çelik üretiminde bir seçenektir. Temel oksijen metodunun aksine elektrik ark fırını sıcak metal kullanmaz. Soğuk metal ile doldurulur. Bu da hurda çeliktir. Hurda çelik elektrik ark fırınına üstten vinçle boşaltılır, ardından fırın kapağı örtülür. Bu kapak ark fırınına indirilen üç adet elektrot taşır. Elektrotlardan geçen elektrik bir ark oluşturur ve açığa çıkan ısı hurdayı eritir. Eritme işleminde diğer metal alaşımlar gerekli kimyasal kompozisyonu sağlamak için ilave edilir. Çeliği saf hale getirmek için ayrıca oksijen de üflenir. Kimyasal kompozisyonun denetimi için örnekler alındıktan sonra, ark fırını yana yatırılıp erimiş çeliğin üzerinde yüzen cüruf dökülür. Hemen sonra ark fırını diğer yana yatırılıp erimiş çelik bir potaya aktarılır.

Modern ark fırını her erimede 150 ton kadar hurda işleyebilir. Bu işlem yaklaşık 90 dakika sürer. Ark fırını ile çelik üretimi aynı zamanda ekonomiktir. Üretilen her ton çelik, 7.4 GJ enerji tüketir. Bu da diğer üretim yönteminin tüketimi olan 16.2 GJ.'e göre hayli düşük kalır.

Hurda gibi demir içeren malzemelerin doğrudan doğruya ergitilmesi, modern çelik üretiminde, önemli bir rolü bulunan elektrik ark fırınlarında (EAF) yapılmaktadır bununla ilgili görsel Şekil 4.7'de verilmiştir. Elektrik ark fırını işlemi Şekil 4.8'de verilmiştir. [34]

Şekil 4.7 : Elektik ark fırınının içerisindeki grafit elektrotları [34].



Şekil 4.8 : Elektrik ark fırını işlemi [34].

Demir çelik tesislerinde 1 ton sıvı çelik üretimi için EAF sistemine temel girdi ve çıktılar Çizelge 4.3'te sayısal olarak verilmiştir.

Çizelge 4.3 : EAF girdi ve çıktıları.

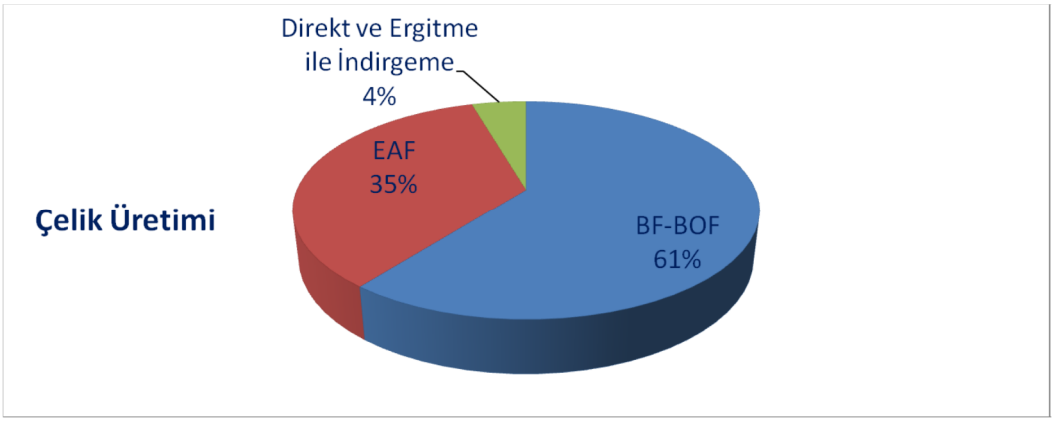
Girdiler			**Çıktılar**		
Hurda	kg/t	1080 – 1130	Sıvı Metal	kg/t	1000
Top. Enerji	kWh/t	650 – 750	Cüruf	kg/t	100 - 150
Elektrik	kWh/t	345 – 490	Partiküler	kg/t	10 - 20
Oksijen	m3/t	24 – 47	Birincil Tozlaşma	mg/m3	3400 - 33900
Kireç	kg/t	30 – 80	İkincil Tozlaşma	mg/m3	150 - 275
Grafit Elek.	kg/t	1,5 - 4,5	Atık Refrakter	kg/t	10
Astar	kg/t	ort. 8,1	İşl. Hurdası	kg/t	125 - 139
Su	Kısa Devre Döngü		Gürültü	dB(A)	(<70)

Şekil 4.9'da elektrik ark fırınlı bir fabrika görülmektedir. Elektrik ark fırının yer aldığı ikiz gövdeli bina, toz, gaz ve duman emisyonlarını azaltmak için tamamen izole edilmiştir [34].

Şekil 4.9 : Elektrik ark fırınlı bir fabrika [34].

Bazik oksijen fırın ve elektrik ark fırının üretimdeki payı Grafik 4.2'de gösterilmektedir.

Grafik 4.2 : Çelik üretiminde bazik oksijen fırın ve elektrik ark fırının üretimdeki payı [29].



5. CÜRUF OLUŞUMU ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Çıkarma ve inceltme ve metalurjik işlemler sırasında oluşan katı atıklara "cüruf" denir. Cüruf tamamen saf olmayan metaller eritildiği zaman yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde biriken daha hafif metallere verilen isimi olarak da tanımlanabilir. Hafif metalin havaya temas edip oksitlenmesiyle oluşur. Ayrıca, ağırlıklı olarak demir oksit ve magnezyum, kalsiyum, alüminyum silikatlar oluşmaktadır. Cürufların soğutulma şekilleri farklı olduğu için, sahip oldukları özellikler de farklıdır. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olurlar. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik gösterir ve çoğunlukla agrega olarak kullanılır. Yol yapımında cüruf kullanımının geçmişi çok eski zamanlara, Roma imparatorluğu dönemine kadar gitmektedir. Demir cürufu M.Ö. 4.yy başlarında meşhur Appia yolunun yapımında bazı katmanlarda kullanılmıştır. İlk demir cürufu üretimi ise 1848'de Avustralya'da Mittagong Şehrinde yapılmıştır. Daha yakın zamanlara bakılacak olursa modern demir cürufunun, yaklaşık kırk yıldır yol yapımında kullanıldığı görülecektir. Hız yollarında ve ağır trafikli yollarda dahi cüruf kullanımı başarılı sonuçlar vermiştir [35].Yol yapımında cürufun kullanımını Şekil 5.1'de gösterilmektedir [36].

Şekil 5.1 : Yol yapımında cüruf kullanımı [36].

Demir çelik endüstrisinde yılda yaklaşık 1.3 milyar ton çelik üretilirken, 500 milyon ton yan ürün, katı atık ve çamurun ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Entegre demir

çelik tesisleri büyük miktarlarda katı atık üretirler. Bu alanda yapılan bir çok çalışmanın da gösterdiği gibi bir ton çelik üretimi sırasında yaklaşık 400-450 kg katı atık üretilmektedir. Bu katı atıklar genelde yüksek fırın ve çelikhane cürufları, tozları, çamurları, kullanılmış refrakterler vs. dir. Günümüzün ilk eğilimi, çelikhane cürufunun maksimum oranda kullanılmasıdır. Yüksek fırın cürufuyla kıyasladığımızda çelikhane cürufunun kullanımı çok daha fazla geliştirilebilir [37].

Demir-çelik üretim sürecinde atık madde olarak oluşan cüruflar, inşaat sektöründe temel altı dolgu malzemesi, karayolu dolgu malzemesi, beton ve çimento katkı malzemesi, ve zemin stabilize malzemesi olarak kullanılabilmektedirler [38].

Morisson R. 1974 yılında Batı Virginia'da yaptığı çalışmada, katı yakıtlı kazanlardan çıkan cürufla, dere malzemesinin karıştırılarak ince tabakalı asfalt kaplamalarda kullanımının uygun olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Boyutları 12,7 mm ile 50,8 mm arasında olan %50 oranında katı yakıtlı kazan cürufu, %39 dere kumu, %3 uçucu kül ve %8 oranında asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan karışımın, ağır kamyon trafiğinin olmadığı yerlerde 10 seneden daha uzun süre yapısal değişikliğe uğramadan hizmet edebildiği gözlenmiştir [39]. Noureldin S. ve McDaniel R. Yaptıkları çalışmada 6 değişik agrega karışımı hazırlanmış, bu karışımlarda toplam agrega içindeki doğal kum %0 - 60, çelik cürufu %100 - 40 oranlarında kullanılmıştır. Bu çalışmada, en düşük bitüm oranı %73 çelik cürufu - %27 doğal kum karışımında elde edilmiştir. Yine bu karışımda en yüksek Marshall stabilite, indirekt çekme ve rijitlik modülü değerlerine ulaşılmıştır [40].

Günümüzde cüruflar genellikle demiryolu balastı olarak, beton agregası ve asfalt agregası olarak, yol temel ve alt temel malzemesi olarak, çimento sanayiinde, briket ve tuğla yapımında, cüruf yünü ve prefabrik elemanların yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [35]. Demiryolunda cürufun balast olarak kullanımını Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Şekil 5.2 : Demiryolu balastı olarak cüruf kullanımı [36].

Çizelge 5.1 : EAF cürufun bazı büyük ülkelerde kullanıldığı alanlar (%) [41].

Kullanım Alanları	ABD	Avusturalya	Almanya	Japonya
Karayolu İnşaatı	60	66	54	61
Çimento/Beton	16	22	-	5
İçsel Geri Dönüşüm	-	-	12	14
İçsel Depolama	-	-	4	-
Gübre Toprak	-	-	5	11
Dolgu/Hidrolik Yapılar	11	12	-	-
Nihai Depolama	-	-	17	2
Diğer	13	-	8	7

Cüruflar "Atık Yönetmeliği Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik"inde tehlikesiz atık kategorisine girmektedir.

5.1 Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırından eriyik durumda atık malzeme olarak dışarı alınan cüruf yaklaşık 1500 °C sıcaklıktadır. Bu cürufun herhangi bir amaçla kullanımı, cürufun soğutulmasından sonra mümkün olmaktadır. Uygulanan soğutulma yöntemi ve hızına bağlı olarak, soğutulmuş duruma getirilen malzeme oldukça değişik yapısal karakteristikler göstermektedir.

Eriyik cüruf, soğutulduktan sonra, çimento üretiminde hammadde olarak, beton yapımında agrega olarak, cüruflu çimento üretiminde portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birlikte öğütülen malzeme olarak, ve beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak değişik amaçlarla kullanılabilmektedir.

Normal atmosferik koşullarda yavaş soğutulan cüruflara "havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu" adı verilmektedir; su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulmuş cüruflara, "genleştirilmiş yüksek fırın cürufu" veya "köpürtülmüş yüksek fırın cürufu" denilmektedir; genellikle bol miktarda su, çok hızlı soğutulma işlemine tabi tutulan cüruflar, kum taneleri gibi (en büyük boyutu yaklaşık 4mm) parçacıklar oluşturduklarından, "granüle yüksek fırın cürufu" olarak anılmaktadırlar.

Havada soğutulmuş cüruflarda, soğutulma işlemi çok yavaş olduğu için, cüruf bünyesinde kristal yapıda kalsiyum-silikatlar oluşmaktadır. Kristal yapılı cürufların hidrolik bağlayıcılık özelliği bulunmamaktadır. Gri, kristal yapılı ve taş gibi sert malzemeye dönüşen cüruflar, kırılarak agrega haline getirilebilmekte ve beton agregası olarak kullanılabilmektedir. Ancak, bu tür cürufların bünyesinde bulunabilecek bir miktar kükürt, betonun hacim sabitliğini olumsuz etkileyebilmekte ve dayanıklılık sorunu yaratabilmektedir. O bakımdan, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufundan elde edilecek agreganın beton yapımına uygunluğu deneylerle tespit edilmelidir.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip olması ve bu tür malzemeden çimento ve beton üretiminde yararlanma imkanı bulunması nedeniyle, yüksek fırından atık olarak dışarı alınan eriyik cürufun soğutulmasında, genellikle çok hızlı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır [42].

Yüksek fırın cürufunun rengi açıktır, buna rağmen çelikhane cürufunun içindeki yüksek miktardaki demir ve magnezyum sebebiyle renk koyu gridir. Şekil 5.3' de yüksek fırın cürufu gösterilmiştir.

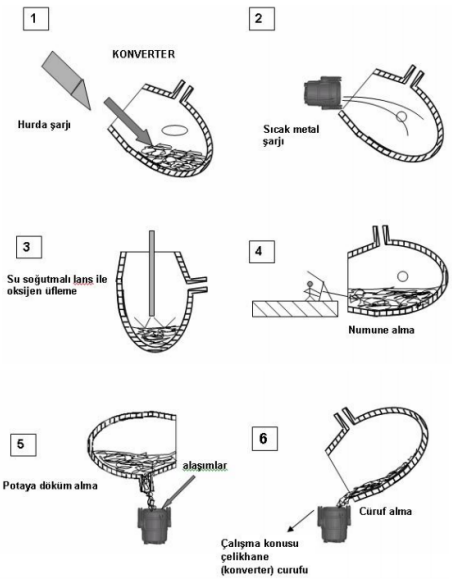
Şekil 5.3 : Yüksek fırın cürufu [58].

5.2 Bazik Oksijen Fırını (BOF) Cürufu

Entegre demir çelik fabrikalarında yüksek fırında demir cevheri eritilerek sıcak maden elde edilirken çelik, çelikhane ünitesinde üretilir. Konverterlerde azaltmak suretiyle çelik haline dönüştürülmektedir. Çelikhanenin ana ekipmanı bazik oksijen konverterleridir. Konverterlerin üstten oksijen üflemeli, alttan üflemeli ve kombine üflemeli tipleri vardır [43].

Demir-çelik fabrikalarında, çelik üretimi sırasında ton basına yaklaşık 400 kg cüruf ortaya çıkmaktadır. Bu cürufun, yaklaşık 250-300 kg'ını yüksek fırın cürufu, 100-150 kg'ını ise çelikhane cürufu oluşturmaktadır.

Çelikhane cürufu, bazik oksijen fırınlarında (BOF) yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Bazik oksijen işleminde sıcak maden, hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) konvertöre şarj edilmekte ve daha sonra konvertör içerisine daldırılan bir lans aracılığı ile yüksek basınçta oksijen üflenmektedir. Üflenen oksijen şarjdaki empüritelerle birleşmektedir. Bu empüriteler karbon (CO gazı olarak), Si, Mn, P ve bir miktar Fe'dir (Sıvı oksitler halinde). Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar, kireç ve dolomitik kireç ile birleşerek cürufu oluşturmaktadır. İşlem bitiminde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100–1500 °C'de özel cüruf potalarına boşaltılarak taşınmakta ve stok alanlarında soğumaya bırakılmaktadır. 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 100–150 kg (%10–15) cüruf oluşmaktadır. Şekil 5.4'te Bazik Oksijen Fırının'da çelik üretimi girdi ve çıktı üretim işlemi gösterilmiştir [44].



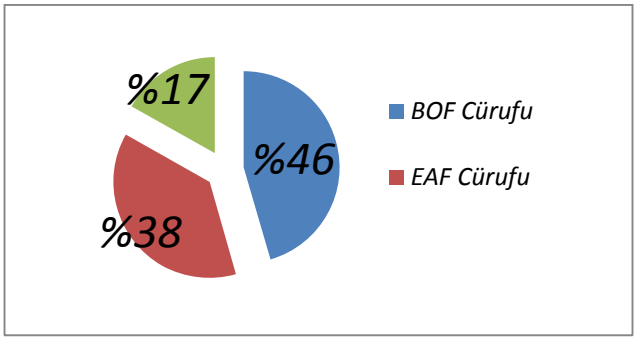
Şekil 5.4 : Konverter (BOF) prosesinin adımları [44].

5.3 Elektrik Ark Fırın (EAF) Cürufu

Elektrik ark ocakları, hammadde olarak hurda demir-çelik kullanır. Elektrik ark ocakları yakıt olarak gaz yakıtlar yerine yüksek güçte elektrik kullanır. Elektrik ark ocaklarının ısı kaynağı grafit elektrotlar ile sağlanır ve hammaddeler istenen fırın sıcaklığına ulaştıkça elektrotlar da fırının alt bölgelerine iletirler. Eriyik hammaddeler içindeki demir ile birlikte alüminyum, silikon, mangan, fosfor ve karbon gibi okside olmuş istenmeyen safsızlıklar, fırına ilave edilen sönmüş kireç veya dolomit ile giderilir ve sistemden çelikhane fırın cürufu olarak uzaklaştırılır. Sisteme ayrıca karbon tozları ilavesi yapılır. Karbon tozları karbon monoksit gazını oluşturur ve cürufun köpükleşmesini ve çelik bileşiminden uzaklaşmada verimi ve ısı transferini artırır.

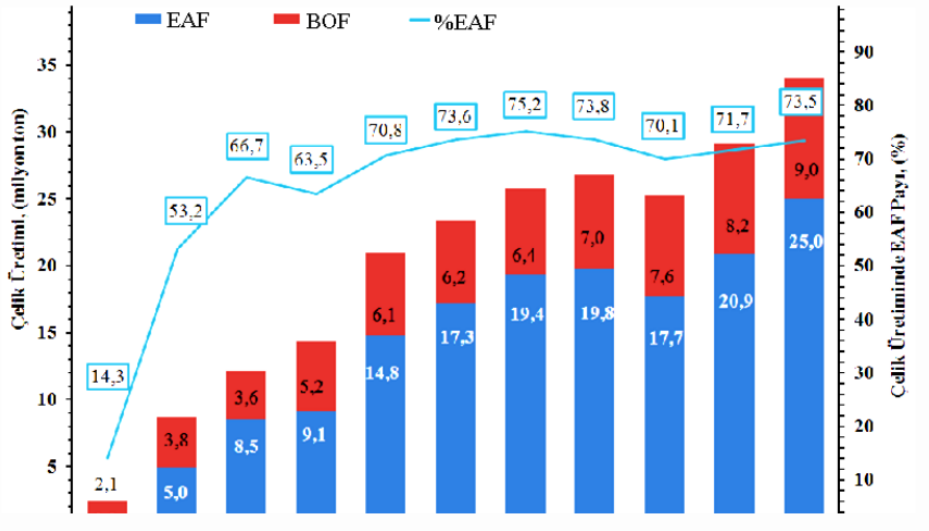
Avrupa'da ortaya çıkan çelik cürufunun miktarı 2012 yılı verilerine göre yaklaşık 21,4 milyon tondur. Grafik 5.1 'da görüldüğü gibi, bu cürufların %46'ü bazik oksijen fırını (BOF) cürufu, %38'sı elektrik ark fırını (EAF) cürufu ve %17'u diğer metalurjik cüruflardır [45].

Grafik 5.1: Avrupa'da çelik cürufu üretimi [46].



2011 yılı istatistiklerine göre Türkiye'de bir önceki yıla oranla %18,1 artışla 34 milyon tondan fazla çelik üretilmiştir. Belirtilen üretimin 1/4 kadarı birincil kaynaklardan olan demir cevherinden (yüksek fırın ve bazik oksijen fırını) diğer bölümü ise hurda olarak adlandırılan başlıca bileşeni demir olan, kullanılma ömürlerinin sonuna gelinmiş malzemeler ve sektörde üretim esnasında oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesiyle (elektrik ark fırını) elde edilmektedir. Ülkemizde yıllık üretim kapasitesi 50.000 tonun üzerinde olan 23 adet EAF ve 3 adet yüksek fırın tesisi mevcuttur. Grafik 5.2'de elektrik ark fırınlı çelik tesislerinde üretilen çelik cürufunu göstermektedir.

Grafik 5.2 : Elektrik ark fırınlı çelik tesislerinde üretilen çelik cürufunun diğer cüruflara oranı [41].



Elde edilen eriyik cüruf soğutulur. Soğutmak için kullanılan hava, su veya hava-su karışımı, soğutma hızı, soğutma süresi ve yaşlandırma işlemi olarak adlandırılan soğutulmuş cürufların açık havada uzun süreler bekletilmesi uygulamaları cürufun fiziksel özelliklerinde oldukça etkilidir. Cüruflara uygulanan soğutma işlemlerinde gözlenen en önemli değişiklikler, cürufun gözenek ve boşluk yapısı, hızlı soğutmada gözlenen camsı özellik ve dolayısıyla camsı geçiş sıcaklığı ve serbest kalsiyum veya serbest magnezyum oksit miktarındaki değişikliklerdir. Soğutma işlemleri sonucunda elde edilen cüruflar kırıcı ve öğütücülerden geçirilerek istenilen boyutlara indirgenir [45]. Şekil 5.5'te elektrik ark fırını cürufu gösterilmektedir.

Şekil 5.5 : Elektrik ark cürufunun görüntüsü [47].

Oda sıcaklığında soğutulduktan sonra elde edilen oksitlenmiş yaklaşık 20 kg ağırlığındaki EAF cürufunun teknik özellikleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir [48]. Ayrıca, EAF cürufunun mineral bileşenleri Çizelge 5.3'de gösterilmiştir [48].

Çizelge 5.2: Elektrik ark fırını (EAF) cürufu ve diğer doğal agregaların teknik özellikleri [48].

Özellikler	Birimler	EAF Cürufu	Bazalt	Granit	Yol İnşaatındaki Gereksinimler		
					Yüzey Katmanı	Temel Tabakası	Yol Temeli
Los Angeles kaybı	%, ağırlık	15-20	9 - 20	12 - 27	<18	<22	<34
Cilalanma	-	54-57	45-56	45-58	-	>43	-
Basma Mukavemeti	MPa	>130	>250	>160	-	-	-
Su Emme Oranı	%, ağırlık	0,3-0,9	<0,5	0,3-1,2	-	<0,5	-
Donma	%, ağırlık	<0,3	<0,8	0,8-1,2	-	<3,0	-
Genleşme	%, hacim	1,0-5,0	-	-	-	<5,0	-
Görünen Ağırlık	Mg / m3	~3,50	~2,95	~2,70	-	-	-
Hacimsel Ağırlık	Mg / m3	~1,60	-	-	-	-	-

Çizelge 5.3 : Elektrik ark fırını (EAF) cürufunun mineral bileşenleri [48].

Bileşim	%	Her aşamanın ana bileşenleri, molar orantı
Dikalsiyum Silikat	30-60	CaO (63–66), SiO2 s30–33d,P2O5 s1–3d
Trikalsiyum Silikat	0-30	CaO (70–73), SiO2 s23–25d
Serbest Kalsiyum Oksit	0-10	CaO (75–90), MnO (2–10), FeO (5–15)
Vüstit	10 - 40	FeO (45–55), MnO (10–20), CaO (10–30), MgO (5–20)
Dikalsiyum Ferrit	5 – 20	CaO (60–65), Fe2O3 s15–45d

6. BİTÜMLÜ TEMEL TABAKASINDA EAF CÜRUFUNUN VE DOĞAL AGREGANIN KULLANIMINA İLİŞKİN LABORATUVAR ÇALIŞMASI

6.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, EAF cürufu ve doğal agrega kullanılmıştır. Kullanılan bitüm ise "TÜPRAŞ" dan alınan B 50/70 bitümdür.

Aşağıda belirtilen malzemeler kullanılarak yapılan deneyler "Karayolları Teknik Şartnamesi 2013" esas alınmıştır. Bitümlü temel tabakasının oluşturulmasında kullanılan bitüm ve agrega malzemelerine ait fiziksel ve mekanik veriler için "İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, Ulaştırma Laboratuvarı" nda gerçekleştirilen çalışmalar sırasında elde edilen değerler kullanılmıştır.

Kullanılan EAF cürufu ve doğal agreganın kimyasal analizi "İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi, Malzeme Laboratuvarı" nda yapılmış ve Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Agregalarda herhangi bir ağır demir bulunmamıştır ayrıca potansiyel genleşme deneyinde %0,5'in üzerinde bir genleşme görülmemiştir.

Çizelge 6.1 : EAF cürufu ve doğal agreganın kimyasal analizi.

İçerik	EAF Cürufu	Doğal Agrega
Metalik Fe	2,94	0,24
Toplam Fe	34,43	0,78
FeO	31,49	0,54
SiO2	13,34	0,92
Al2O3	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

6.2 Malzemelere Uygulanan Fiziksel Deneyler

6.2.1 Agrega deneyleri

6.2.1.1 Elek analizi

Elek analizi, kullanılacak doğala agreganın ve cürufun granülümetrisinin tayini ASTM C 136, C117'ye uygun olarak yapılır. Kullanılacak malzemelerin miktarı ve türüne göre farklı çaplarda elek setlerinden bu elemeler yapılarak, hangi deneyde kullanılacaksa o deneyin şartnamede istediği elek aralıklarına göre numuneler elenir. Agrega numunesi içindeki tanelerin büyüklüklerine göre dağılımına granülometri, agregada tanelerin dağılımını gösteren eğriye de granülometri eğrisi denir. Elek analizi, ince ve kaba agreganın granülometrisini tayin etmek için yapılır. Agreganın içermiş olduğu her sınıf malzemenin birbirini dolduracak nitelikte olması gerekmektedir. Bu nedenle granülometrinin belirlenmesi için yapılan elek analizi deneyi önemli bir deneydir. Ayrıca elek analizi deneyi ile incelik modülü ve kaba agreganın maksimum tane boyutu tespit edilir [49]. Deneylerde kullanılan elekler Çizelge 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de kullanılan elekler gösterilmiştir. Bu elekleri kullanarak Şekil 6.2'deki gibi elde edilen belirli aralıktaki doğal agrega/cüruf briket yapımında kullanılmak üzere daha sonra kurutularak tartılacaktır [22].

Çizelge 6.2 : Kullanılan elek aralıkları [22].

Elek Aralıkları	
Elek No	**Boyut (mm)**
1"	25
3/4"	19
1/2"	12,5
3/8"	9,5
No.4	4,75
No.10	2,00
No.40	0,425
No.80	0,180
No.200	0,075

Şekil 6.1 : Kullanılan elekler.

Şekil 6.2 : Numunenin eleme aşaması.

Bu eleklerden numunelerimiz elendikten sonra dane boyutlarına göre;

- Kaba agrega/cüruf 4 No'lu (4,75mm) elek üzerinde kalan,
- İnce agrega/cüruf 4 No'lu (4,75 mm) - 200No'lu (0,075 mm) arasında kalan,
- Mineral filler ise 200 No'lu (0,075 mm) den geçen

olmak üzere sınıflandırılmıştır.

6.2.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi

Kaba agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi

Kaba agregaların özgül ağırlıkları ve su emme oranları ASTM C127 standarttı kullanılarak deneyleri yapılmıştır. Deney esnasında kullanılacak numunelerin ağırlıkları Çizelge 6.2'de gösterilmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra Şekil 6.3'te gösterilen tel sepetin içine konularak 23 ± 2 ^{0}C suyun içinde 24 saat bekletildikten sonra numuneler sıvı emiş gücü yüksek bir bez ile agregalar kurutulmuştur. Yüzeyleri kurutulan agregaların doygun kuru yüzey ağırlığı tartılır (B). (Şekil 6.4) Numunenin sudaki ağırlığını ölçmek için tel sepete konularak suda tartımı yapılır (C). Suda tartım yapılan numune geniş bir tepsiye konularak 110 ± 10 ^{0}C'deki etüve konularak burada 24 saat boyunca bekletilir. Kurumuş olan numune etüvden çıkartıldıktan sonra soğuması için oda sıcaklığında yaklaşık 4 saat bekletilir ve oda sıcaklığında soğuyan numune tartılır (A). Tartılan bu değerler aşağıdaki denklemlerde kullanılarak kullandığımız agreganın özgül ağırlığını ve su emme oranı hesaplanır [50].

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{A}{(B-C)} \qquad \textbf{(6.1)}$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{(A-C)} \qquad \textbf{(6.2)}$$

$$\text{Su Emme Yüzdesi (\%)} = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \qquad \textbf{(6.3)}$$

Burada:

A = Kuru ağırlık (g)

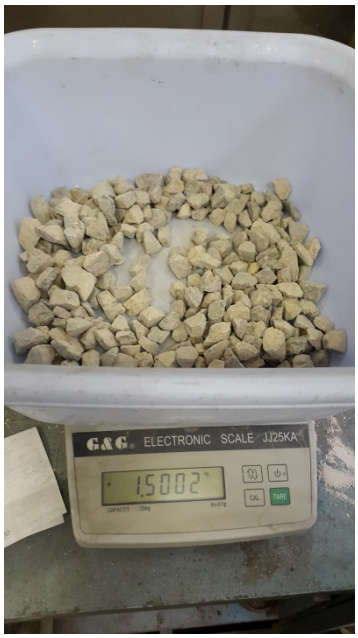
B = Doygun kuru yüzey ağırlık (g)

C = Sudaki ağırlık (g)

Çizelge 6.3 : Kaba agrega için özgül ağırlık ve su emme oranı tayini sırasında kullanılan numune ağırlıkları [50].

Elek Aralığı (mm)	Numune Ağırlığı (g)
25-19	2000,0
19-12,5	1500,2
12,5-4,75	1000,0

Şekil 6.3 : Hazırlanan numuneleri tel sepete konuluşu.



Şekil 6.4 : Kuru numunenin tartılması.

İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi

İnce agreganın özgül ağırlığı ve su emme oranı deneyi ASTM C 128 standardına göre yapılmıştır. Deney için ASTM D 75 standardında belirtilen belirli granülometrideki 1000 g numune hazırlanarak etüvde kurutulmadan geniş bir tepsi içinde, içerisine su konularak 24 saat boyunca bekletilir. Doygun hala gelmiş numune dikkatlice süzüldükten sonra emici olmayan bir yüzeye serilir. Doygun kuru yüzey ağırlığının belirlenmesi için numune üstüne sıcak kuru hava üflenerek karıştırılmıştır. Bu işlem malzeme serbest akar hale gelesiye kadar devam ettirilir.

Hazırladığımız bu 1000 g'lık numuneden 500 ± 10 g alınmış ve tartılmıştır (S_1). Tartılan numune bir piknometrenin içerisine dökülmüş ve referans çizgisinin (500 ml) biraz altında kalacak şekilde içerisine su eklenmiştir. Daha sonra kapağı kapatılan piknometre iyice çalkalanmış gerekirse şişlenerek numune içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır. Hava kabarcığı kalmadığından emin olunan numunenin üstü 500 ml'e kadar su ile doldurulmuştur. Numune oda sıcaklığına gelinceye kadar ısıtıldıktan sonra tartılmıştır (C). Tartılan karışım geniş bir tepsiye dökülmüş ve karışımın tamamen kuruması için 110 ± 5˚C'de 24 saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Kuruyan numune 1-2 saat boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra tekrar tartılmıştır (A_1). Daha sonra piktometreye tekrar konulan numune referans çizgisine kadar su ile doldurulmuş içindeki hava kabarcıklarından kurtulmak için aynı işlemler tekrarlandıktan sonra tartılmıştır (B).

Su emme oranını belirlemek için, 1000 g numuneden arta kalan 500 ± 10 g alınmış ve tartılmıştır (S_2). Daha sonra numune kuruması için sıcaklığı 110 ± 5˚C olan etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numune oda sıcaklığında soğutulduktan sonra tartılmıştır (A_2).

Aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplar yapılmıştır [51].

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{A}{B+S-C} \quad \textbf{(6.4)}$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{B+A-C} \quad \textbf{(6.5)}$$

$$\text{Su Emme Yüzdesi} = \frac{S}{S-A} \text{ X } 100 \quad \textbf{(6.6)}$$

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)

Minarel filler için özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi

Mineral fillerin özgül ağırlığı ve su emme oranı deneyi ASTM C 128 standardına göre yapılmıştır. 0,075 mm eleğin altında kalan malzeme etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat boyunca bekletilir. Sabit ağırlığa gelen malzemeden 20 g alınarak 1 mg hassasiyetli tartıda tartılmıştır (A). Piknometre referans çizgisine kadar su ile doldurulduktan sonra oda sıcaklığa gelesiye kadar ısıtılıp tartılmıştır (B). Boşaltılan

piktometreye 20 g'lık malzeme konulduktan sonra bir miktar saf su ile doldurulup içerisindeki hava boşluklarından kurtulmak için vakum makinasına bağlanmıştır. Şekil 6.5'te kullanılan hassas tartı ve vakum makinesi gösterilmektedir. İçerisindeki boşluklarından arınan numune Şekil 6.6'da gösterildiği gibi piknometrenin referans çizgisine kadar doldurulmuş ve oda sıcaklığına gelesiye kadar ısıtılmış ve tartılmıştır (C).

Aşağıdaki bağıntı kullanarak hesaplamalar tamamlanır [51].

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{A}{A+B-C} \qquad \textbf{(6.7)}$$

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)

Şekil 6.5 : Hassas terazi ve vakum makinesi.

Şekil 6.6 : Piknometrenin referans çizgisine kadar su ile doldurulması.

6.2.1.2 Los Angeles deneyi

Agregaların kullanıldıkları alana göre mekanik etkiler yüzünden farklı şekillerde ufalanabilir, parçalanabilir ve aşınabilir. Bu deformasyonun belirli bir oranda kalması yapının güvenliği için önemlidir. Aşınma yani Los Angeles deneyi agreganın yüzde kaç oranında aşınmaya karşı dirençli olduğunu anlamamızda yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Agreganın hangi alanda kullanılacağına bağlı olarak farklı aşınma yüzdeleri isteniyor olabilir. Bitümlü temel yapımında kullanılacak agreganın aşınma yüzdesi 30%'den küçük olması istenmektedir ($\leq LA_{30}$).

Los Angeles deneyi, kullandığımız numunelerdeki kaba agreganın parçalanmaya karşı gösterdiği direnci saptamak için ASTM C131 deney şartnamesine göre yapılmıştır. Deney laboratuvarda bulunan standartlara uygun iki yanı kapalı, tamburun iç çapı 71 cm ve eni 51 cm olan Şekil 6.7'de gösterilen Los Angeles makinesi ile yapılmıştır. Bu şartnameye göre 19 – 12,5 mm elek aralıkları arasında kalan malzemeden 2500 g, 12,5 – 9,5 mm elek aralıkları arasında kalan malzemeden 2500 g alınacaktır. Etüvde kurutulduktan sonra belli bir ağırlık kaybı yaşanacağından yaklaşık olarak her bir aralıktan 2500 g değerinde numune alınmış ve üzerindeki toz parçalarından arındırmak için yıkandıktan sonra etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat boyunca bekletilir. Kuru numunelerden 19 - 12,5 mm elek aralıkları arasında kalan malzemeden 2500 g, 12,5 – 9,5 mm elek aralıkları arasında kalan malzemeden 2500 g alınarak toplamda 5000 g numune deney için hazırlanmıştır (A). ASTM C131'e göre cüruf ve doğal agrega malzemesi için B sınıfı seçilmiştir. B sınıfına göre numuneler Los Angeles aletine yerleştirildikten sonra Şekil 6.8'te gösterilen çapı 4,68 cm ve ağırlığı 410 g olan çelik bilyelerden 11 tane alınarak tambura yerleştirilmiştir. Los Angeles makinesinin kapağı kapatılarak mandalları sıkılmış ve dakikada 30 - 33 devir hızla döndürülerek 500 kez devir yaptırılmıştır. Yaklaşık 15 dakika süren bu işlemin ardından numune Los Angeles makinasından çıkartılıp 12 No'lu elekten (1,68mm) elenmiştir. Bu eleme işleminde elek üstünde kalan kısım üstündeki toz parçalarından kurtulmak için yıkanmış ve etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat boyunca bekletilip kurutulmuştur. Etüvden alınan malzeme son kez tartılmıştır (B).

Aşağıdaki bağıntı kullanılarak kaba agreganın aşınma değeri yüzde cinsinden hesaplanabilir [52].

$$\text{Aşınma Kaybı (\%)} = \frac{A-B}{A} \qquad \textbf{(6.8)}$$

A: İlk ağırlık (kuru) (g)

B: Son ağırlık (kuru) (g)

Şekil 6.7 : Los Angeles makinesi

Şekil 6.8 : Los Angeles deneyi bilyeleri

6.2.1.4 Hava tesirine karşı dayanıklılık (donma-çözülme) deneyi

Agregaların hava etkisiyle birlikte don olayında ufalanmaya karşı dirençlerini tahkik etmek için TS EN 1367-2 şartnamesi baz alınarak yapılan, laboratuvar ortamında hızlandırılarak yapılan, litre başına 350 g saf magnezyum sülfat tuzu ($MgSO_4$) kullanılarak yapılan deneydir.

Şartnameye göre 19 - 12,5 mm elek aralığında kalan agregalardan 330 ± 10 g, 12,5-9,5 mm elek aralığında kalan malzemeden de 670 ± 10 g numune alınarak karıştırılmış, üzerinde kalan toz parçalarından arındırmak için Şekil 6.9'da gösterildiği gibi yıkandıktan sonra etüvde 110 ± 10 ^{0}C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Etüvden çıkartıldıktan sonra toplam malzeme tartılmıştır (A). Daha sonra bir tencereye konulan malzeme Şekil 6.10'da gösterildiği gibi üzeri en az 2 cm geçecek bir şekilde magnezyum sülfat çözeltisi eklenmiştir. Oda sıcaklığında yaklaşık 16 saat bekletilen numune bu işlemden sonra 8 mm'lik elekten süzülmüştür. Tekrar tencereye konulan malzeme kuruması için tekrar etüvde 110 ± 10 ^{0}C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek sabit ağırlığa getirilmiştir. Etüvden çıkartılan malzeme oda sıcaklığında soğuması için yaklaşık 1 saat bekletildikten sonra tekrardan numunenin üzerini en az 2 cm aşacak şekilde magnezyum sülfat çözeltisi eklenmiştir. Bu işlem beş kez tekrarlanmıştır. Beşinci işlemin sonunda etüvden çıkartılan malzeme soğutulduktan sonra 8 mm'lik elekten elenmiş ve 8 mm'lik elek üstünde kalan numune su ile yıkandıktan sonra etüvde 110 ± 10 ^{0}C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek kurutulmuştur.

Şekil 6.9 : Tozlardan arındırmak için malzemenin yıkanması.

Şekil 6.10 : Malzemenin üzerine magnezyum sülfat çözeltisinin eklenmesi.

6.2.1.5 Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi

Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi, ASTM C 142 standardında belirlenmiş elek aralıklarına göre ince ve kaba agrega olarak ayrılan numunelerin suda çözünen ve dağılan oranlarını belirlemek için yapılan deneydir. Standartta belirtilen Çizelge 6.3'te gösterilen aralıklardaki ve ağırlıktaki numuneler yıkanmadan doğrudan etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Kuruyan malzemeler tartılmıştır (A). Tartılan elek aralığındaki her bir malzeme ayrı ayrı geniş tepsilere yayılarak su ile doldurularak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Hazırlanan numuneler her bir elek aralığı karşısına denk gelen elek (Çizelge 6.3) ile elendikten sonra elek üzerinde kalan numune kuruması için etüvde 110 ± 10 ^{0}C sıcaklıkta 24 saat bekletildikten sonra tartılmıştır (B).

Aşağıdaki bağıntı kullanılarak kil topakları ve ufalanabilir tane oranı yüzdesi hesaplanmıştır.

$$\text{Dağılabilen Tane Oranı (\%)} = \frac{M_2}{M_1} \text{ x } 100 \qquad \textbf{(6.9)}$$

A: İlk ağırlık (kuru) (g)

B: Son ağırlık (kuru) (g)

Çizelge 6.4 : Malzeme elek aralıkları ve karşılık gelen elek boyutu.

Elek Aralıkları (mm)	Elenen Elek Aralıkları (mm)
İnce Agrega	
1,18 - 4,75	0,850 mm (No.200)
Kaba Agrega	
4,75 - 9,5	2,36 mm (No.8)
9,5 – 19	4,75 mm (No.4)
19 – 25	4,75 mm (No.4)

6.2.1.6 Yassılık indeksi deneyi

Karayolu inşaatında kullanılan agreganın fazla miktarda yassı dane içermesi yolun dayanımını düşürecektir. Bu sebepten dolayı karayolu inşaatında kullanılan agreganın yol katmanına göre değişiklik göstermekle beraber belli değeri aşmaması istenir. Yassılık indeksini saptamak için BS 812-105.2 şartnamesi kullanılmıştır. Şartnameye göre bitümlü temelde kullanılan agreganın yassılık oranının %30'dan az olması istenmektedir.

Kullanılan doğal ve cüruf agregasından deney için alınan numune miktarları elek aralıklarıyla beraber Çizelge 6.4'te verişmiştir. Her bir elek aralığındaki numuneler üzerindeki birbirlerine karıştırılmadan tozlarından arındırmak için yıkandıktan sonra etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat bekletilmiştir. Kuruyan numuneler ayrı ayrı tartılmıştır (M_1) ve Şekil 6.11'de gösterilen silindirik çubuklu eleklerden elenir. Eleme işlemi Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Her bir elek üzerinde kalan numune tekrar tartılır (M_2).

Aşağıdaki bağıntıyla yassılık indeksi hesaplanır.

$$\text{Yassılık İndeksi (\%)} = \frac{M_2}{M_1} x100 \qquad \textbf{(6.10)}$$

Çizelge 6.5: Yassılık indeksi için kullanılan numune miktarları.

Elek Aralıkları(mm)	Numune Miktarı (g)
37,5 - 28	3000
28 - 20	3000
20 - 14	2000
14 - 10	1000
10 - 6,35	500

Şekil 6.11 : Yassılık indeksi elekleri.

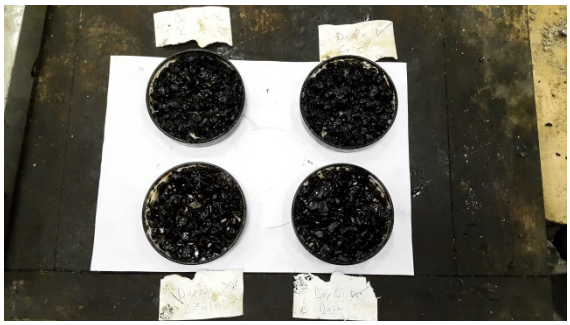
Şekil 6.12 : Yassılık indeksi eleklerden eleme işlemi.

6.2.1.7 Soyulma mukavemeti deneyi

Soyulma mukavemeti deneyi TS EN 12697-11 deney şartnamesi esas alınarak yapılır. Bitümlü temel için soyulma yüzdesi %60'ın altında olması istenmemektedir. Bu deneyde cüruf ve doğal agrega numuneleri kullanılarak her numune için doplu ve dopsuz olmak üzere ikişer numune hazırlanacaktır. 9,5 – 6,35 mm'lik elek aralığında kalan numuneden cüruf ve doğal agrega için 200 g alınarak yıkanmış ve etüvde 110 ± 10 ^{0}C'de 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Kurutulan numuneden cüruf ve doğal agregadan 100'er g alınarak sıcaklığı 160 ^{0}C'ye gelesiye kadar ısıtılır. Cam kaplara

konulan 100 g'lık numuneler sıcaklığı 140 ^{0}C olan doplu bitümden Şekil 6.13'te gösterildiği gibi 5 g konularak sıcak bir ortamda agreganın bütün yüzeyleri bitümle kaplanacak şekilde karıştırılır. Karışım hazırlandıktan sonra sivri gözüken uçlar kaşık yardımıyla ezilerek üniform bir yüzey elde edilmeye çalışılır. Bu aşamadan sonra cam kap su ile doldurularak 60 ± 5 ^{0}C'de 24 saat bekletilmeye bırakılır. Aynı işlem dopsuz bitüm ile de yapılır. 60 derecelik etüvden çıkartılan malzemenin üst yüzeyi incelenerek göz kararı bir soyulma oranı hesaplanır ve kaydedilir. Etüvden çıkartılan yüzeyi soyulmuş numune Şekil 6.14'te gösterilmektedir.

Şekil 6.13 : Numunelerin üzerine 5 g doplu bitüm eklenmesi.



Şekil 6.14 : Etüvden çıkartılmış yüzeyi soyulmuş numune.

Deney sonunda tüm agreganın tanelerinin soyulmamış yüzeylerinin bütün yüzeye oranı, soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verir [22].

Dop katkı maddesi, bitümün içine katıldığında bitümü sıvılaştıran ve yapışma özelliğini arttıran bir maddedir. Bitüm ve agrega arasındaki adezyon bitümlü kaplamaların ömrü açısından önemli bir faktördür. Yol yüzeylerinde oluşan bozulmaların sebebi adezyon eksikliği ve soyulmadır. Su belli koşullar altında

bitümü agregadan ayırma özelliğine sahip olup bu olayın bağlamasını takiben trafik bunu hızlandırmaktadır. Birçok agrega suyla; bitüme oranla daha kolay ıslanır. Soyulma olayını engellemek için anti-stripping denilen soyulma mukavemetini artırıcı malzemeler kullanılır. Bu malzemeler asfaltın içine düşük oranlarda karıştırılarak soyulma olayını engellemeye çalışılır. Bütün bir asfalt üstyapının maliyeti göz önünde bulundurulduğunda; bu mukavemet artırıcıları kullanmak pek bir ekstra maliyet göstermemekte; diğer taraftan da iyi bir koruyucu vazifesi yaparak asfalt ömrünü uzatmaktadır [53].

6.2.1.8 Organik madde deneyi

Agregaların içinde bulunan organik maddeler yani çürümüş bitkiler, humuslu topraklar, şeker gibi, agrega yığınının içerisine karışmış olan maddeler yol üstyapısında çatlaklara yol açabilir. Kullanılan agregalarda organik madde oranının sodyum hidroksitle tayini bu açıdan önemlidir. TS EN 1744-1'e göre yapılan organik madde tayini 8 mm'lik elekten elenen agreganın etüvde 55 ± 5 ^{0}C'de kurutulmasıyla başlar. Kurutulan numune ince uzun bir tüpe 130 ml seviyeye gelinceye kadar konulur. Üstüne %3 oranında (1000 ml su için 30 g NaOH çözeltisi) hazırlanan NaOH çözeltisi 200 ml eklenir. Ağzı kapatılan tüp iyice çalkalandıktan sonra 24 saat boyuna dinlenmeye alınır. Daha sonra numunenin rengi renksiz veya açık sarı ise organik madde tayini negatif, koyu sarı veya kırmızıya dönük ise organik madde tayini pozitif olarak kaydedilir.

6.2.1.9 Metilen mavisi deneyi

Metilen mavisi deneyi 2 mm elek altında kalan ince agreganın kirlilik oranının saptanması için süspansiyon agrega saf su karışımı içerisine belirli miktarda saflığı en az %98,5 olan metilen mavisi ile hazırlanan metilen mavisi eklenerek TS EN 933-9 deney standardı göz önüne alınarak yapılır. Her litre saf su için 10,0 ± 0,1 g metilen eklenmiştir. Çözeltiden alınan sıvının filtre kâğıdına damlatılarak kir tutunmamış boya gözlemlenmesi, filtre kâğıdı üzerinde iki farklı tonda boya tespiti yapılmasını amaçlamaktadır. Hazırlanan numune 45 ± 5 ˚C sıcaklıktaki etüve kurutulmuş ve 2 mm elekten elenerek, elek üzerinde kalan numune ayrılmıştır. Elek altında kalan malzemeden 200 g tartılmış ve kaydedilmiştir (A).

Cam beher içerisine 500 ± 1 ml saf su eklenmiştir. Daha sonra beherin içerisine tartılmış olan ince agrega numunesi dökülmüştür. Karışım, Şekil 6.15'te gösterilen

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. Karışım sonrasında karışım içerisinden bir damla sıvı alınarak filtre kâğıdına damlatılmıştır. Bu damlanın yarattığı leke kontrol edilmiş ve iki farklı tonda boya elde edilinceye kadar karışıma 1'er ml çözelti eklenmiş, Filtre kâğıdında ilk tespit edilen iki farklı tondaki boya 5 dakika boyunca gözlemlenmiş ve açık renkte kaybolma gözlemlenmiş ise karışıma çözelti eklenmeye devam edilmiştir. Filtre kâğıdındaki çözeltinin 5 dakika içinde kaybolmadığı gözlemlendiği an (Şekil 6.16) çözeltiye eklenmiş olan metilen mavisi çözeltisinin hacmi kaydedilmiştir (B).

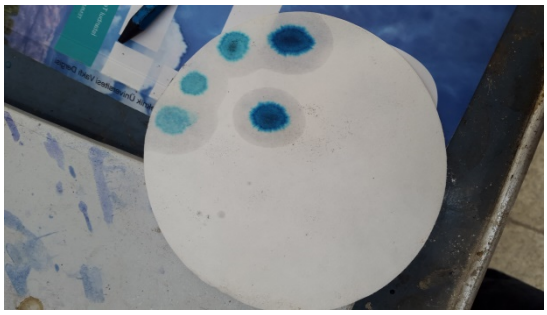
Aşağıdaki bağıntı kullanılarak metilen mavisi oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Metilen mavisi değeri} = \frac{A}{B} x100 \qquad \textbf{(6.11)}$$

A = Karışıma eklenen metilen mavisi çözeltisi (ml)

B = Numune ağırlığı (g)

Şekil 6.15 : Metilen mavisi deneyinde kullanılan mikser.



Şekil 6.16 : Filtre kağıdındaki çözeltinin renk değişimi.

6.2.2 Bitüm deneyleri

6.2.2.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyonun kelime anlamı, batma veya içe girme demektir. Bitümlü bağlayıcının sertlik veya kıvamlıkları belirlemek için yapılan bu deneyde TS EN 1426 veya ASTM D5 standartları kullanılır. Standart bir iğnenin, 25°C sıcaklık şartlarında, belirli bir yük (100 g) altında belirli bir süre (5 sn) asfalt çimentosu içine dikey olarak battığı mesafe 0,1 mm cinsinden bulunur. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır. Penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar. Kıvamlılık artıkça bitüm sertleşir. Deney sonunda okunan değer 100 ise, asfaltın penetrasyonu 100 demektir; yani iğne asfaltın içerisine 1 cm girmiş demektir. En az üç kez okuma yapılması gerekmektedir [19]. Bu deneyde kullanılan penetrasyon aletine penetrometre denir. Bu okumalar en kısa zamanda yapılmalıdır. İğne, her seferinde uygun bir çözücü ile (karbon tetra klorür, tri klor etilen, benzin) ısıtılmış bezle silinir. Sonra kuru bezle temizlenir [54].

Viskozite ve penetrasyon derecesi benzer sayılarla verilir. Örneğin 80 - 100 penetrasyonlu asfalt, 50 - 100 viskoziteli asfalt gibi. Fakat bunlar farklı şeylerdir. Bunların benzer Şekilde ifade edilmesi yanılmalara yol açar. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak bağlayıcı söz konusudur. Buna karşılık viskozitede durum terstir. Normal yol işlerinde kullanılan asfaltların penetrasyonu 30 ile 300 arasında değişir. Penetrasyonu aynı olan iki asfalttan yumuşama noktası yüksek olan sıcağa daha dayanıklıdır [10].

6.2.2.2 Özgül ağırlık deneyi

Bitüm numunesinin özgül ağırlığını belirlemek için oda sıcaklığında hacmi bilinen bir bitüm miktarının, aynı sıcaklıktaki ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına bölünmesiyle elde edilir. Bu deney bitümün özelliklerinin bilinmesi açısında önemli

bir yer taşır. Bitümün özgül ağırlığının bilinmesi hidrokarbonlu bağlayıcının cinsini gösterdiği gibi şartnamelerde kaplamalara ait oranlar verilirken oranlar yüzde cinsinden verilir, buna rağmen bağlayıcılar çoğunlukla hacimle ölçülür. Bağlayıcının genleşme katsayının bilinmesi herhangi bir sıcaklıktaki özgül ağırlığını vermesi açısından önemlidir.

Özgül ağırlığın saptanması için TS 1087 standardı kullanılarak piknometre yöntemiyle ölçülür. Bu deneye başlarken önce boş bir piknometre kabı kuru olarak tartılır ve kaydedilir (A). Piknometre kabına saf su doldurularak tekrar tartılır (B). Daha sonra piknometre kabı boşaltılarak kurutulur ve piknometrenin üçte ikisini kaplayacak şekilde içine bitüm koyulur ve hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilir ve tartılır (C). Geriye kalan üçte birlik kısım su ile doldurulduktan sonra tekrar tartılır (D).

$$\text{Özgül Ağırlık} = \left(\frac{\text{C-A}}{\text{B-A-(D-C)}}\right) \qquad \textbf{(6.12)}$$

Burada;

A = Piknometre ağırlığı (g)

B = Su ile dolu piknometre ağırlığı (g)

C = Piknometre ve asfalt ağırlığı (g)

D = Piknometre, asfalt ve su ağırlığı (g)

6.2.3 Marshall deneyi

Marshall deneyi TS EN 12967-34 standardı baz alınarak yapılmaktadır. Bu deney prensip olarak bitümle kaplanan agrega briketinin yanal yüzeylerine yükleme yapılarak plastik akmaya karşı gösterdiği direnci ölçer. Deneyde kullanılan agregaların dane çapı maksimum 25 mm olmakla birlikte penetrasyon derecesi belli bitüm ile agregaların sıcak karıştırılmasıyla yapılmaktadır.

Marshall yönteminde öncelikle deney numuneleri hazırlanır. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak malzemeler için aşağıdaki işlemlerin yapılması gerekir:

• Karışımda kullanılacak malzemeler proje şartnamelerinde istenen özelliği sağlamalıdır.

• Agrega karışım granülometrisinin şartname granülometrisine uygun olması sağlanmalıdır.

• Kullanılacak malzemelerin yoğunluk ve boşluk analizleri, karışımda kullanılacak agregaların hacim özgül ağırlıkları ve asfalt çimentosunun özgül ağırlıkları tespit edilir [55].

6.2.3.1 Marshall briketlerinin hazırlanması

Marshall briketlerinin hazırlanması için KTŞ 2013'de bitümlü temel tabakası için hazırlanan "Bitümlü Temel Tabakası İçin Gradasyon Limitleri" kısmından Tip-A gradasyon limitleri seçilmiştir. Elek aralıklarının gerektiği kadar numune önceden hazırlanmış ve stoklanmıştır. Bu deneyde doğal agrega için 1200 g numune, Özçelik EAF cürufu için 1450 g numune hazırlanacaktır. Doğal agrega ve cüruf agregası için 21 + 21 toplam 42 tane briket hazırlanması gerekmektedir. Çalışmada her üçlü briket için bitüm oranları %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 - %6,5 ve %7 olarak belirlenmiştir.

Deneye başlamadan önce deney briketlerin kolayca kalıplardan çıkabilmesi ve karışım kovası içindeki malzeme kaybını aza indirmek için deney sırasında kullanılacak briket kalıplarını ve karışım yapılacak kovanın içini gres yağı ile yağlanmalıdır. Briketlerin numaralandırılması da deney sırasında numunelerin karışmasını önlemek için önemli bir tedbirdir. Gradasyon limitlerine göre ayrılan agregalar ayrı ayrı kaplara konularak etüvde 110 ± 10 ^{0}C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek kurutulmalı ve TÜPRAŞ B 50/70 bitümü ise 170 ± 10 ^{0}C sıcaklığa ulaştığı zaman karışım yapmaya başlayabiliriz. Agrega ve bitüm istenilen sıcaklığa geldiği zaman agrega karışım kovasına konulur ve tartı üzerinde darası alınır. Hangi bitüm yüzdesinde yapılacaksa üzerine o kadar gram bitüm konularak karıştırılmak üzere miksere konur. Mikserde agregalarının yüzeyi tamamen bitüm ile kaplanasıya kadar karışım yapılır. Daha sonra lazer ısı ölçer ile sıcaklık kontrolü yapılır karışım 155 ± 5 ^{0}C sıcaklığa gelinceye kadar tüp üzerinde ısıtılır. İstenilen sıcaklığa gelen numune önceden hazırlanmış briket kalıbı içine başta 1/3 oranında konularak briket kalıbı içindeki karışım 25 kere şişlenir. Daha sonra karışım kovasındaki karışımın diğer 1/3 lük kısmı briket kalıbına dökülerek 25 kez şişlenir. Son olarak karışım kovasında kalan numunenin tamamı kalıba dökülerek 25 kez şişlendikten sonra sıcaklık kaybını azaltmak için hızlı bir şekilde 457,2 mm (18 inç) yükseklikten düşen 4536 g (10 lb) ağırlığındaki Marshall tokmağı düzeneğine yerleştirilerek briketin her

iki yüzüne 75'er darbe vurulur. Daha sonra soğuması için 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilir.

6.2.3.2 Marshall akma ve stabilite ölçülmesi

Soğuyan briketler kalıplardan kriko ile çıkartıldıktan sonra kumpas ile brikettin üç farklı yerinden kalınlıklar okunur ve tabloya kaydedilir. Daha sonra havadaki ağırlığı ölçülür, su sepetinin içine konularak sudaki ağırlığı ölçülür ve sudan çıkartıldıktan sonra briketin yüzeyindeki sular emici bez ile kurutulduktan sonra doygun kuru yüzey ağırlığı ölçülür. Bütün briketlerin ağırlık ve kalınlık ölçümleri tamamlandıktan sonra 60 ± 1 ^{0}C sıcaklıktaki suda 30 dakika bekletilir. Sudan çıkartılan briketler Marshall deney aletine konularak yükleme hızı 50,80 mm/dakika 'ya getirilir, akma ve Stabilitesi ölçülür. Burada sudan çıkartılan numunenin yüksekliği 63,5 mm'den (2,5 inç) farklıysa Marshall Stabilitesi düzeltme katsayıları kullanılarak yük düzeltilir. Düzeltme faktörü aşağıdaki bağıntı sayesinde her bir briket yüksekliği için hesaplanır.

$$c = 5{,}24 \times e^{-0{,}0258 \times h} \qquad \textbf{(6.13)}$$

Deneyde; üst segman sabittir. Basınç arttıkça stabilometrede okunan değer artarak maksimuma ulaşır, daha sonra düşmeye başlar. Bu anda numune kırılır. Stabilometrede okunan maksimum değer yardımıyla bitümlü karışımın stabilitesi saptanır. "Marshall Stabilitesi" adı verilen bu değer numunenin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında numunenin çökme ya da hareket miktarı da ölçülür. Buna "Akma" denir. Ayrıca bu deneyle karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu bulunan agrega boşluğu yüzdesi de saptanır [10].

6.2.3.3 Marshall deneyi hesapları

Doğal agrega ve cürufun optimum bitümünü bulabilmek için Marshall metodu uygulanmıştır. KTŞ 2013'e göre bitümlü temel için Tip-A gradasyon limitleri alınarak agrega karışımı B 50/70 penetrasyon derecesi belli (58,3 mm) bitüm, %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 - %6,5 ve %7 bitüm oranlarıyla karıştırılarak her bir bitüm yüzdesi için 3'er adet toplam 42 adet (21 doğal agrega için 21 cüruf için) briket üretilmiştir. Ek.1 ve Ek.2'deki tabloların hesapları aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = B - C \quad \textbf{(6.14)}$$

$$D_P = \frac{A}{V} \quad \textbf{(6.15)}$$

$$D_{Port} = \frac{(D_{p1}+D_{p2}+D_{p3})}{3} \quad \textbf{(6.16)}$$

$$W_b = \frac{W_a}{100+W_a} \text{ x } 100 \quad \textbf{(6.17)}$$

$$G_{ag} = \frac{100}{\frac{\%K}{G_k}+\frac{\%İ}{G_i}+\frac{\%M}{G_m}} \quad \textbf{(6.18)}$$

$$D_t = \frac{100+ W_a}{\frac{100}{G_{ef}}+\frac{W_a}{G_b}} \quad \textbf{(6.19)}$$

$$V_h = \frac{D_t - D_{Port}}{D_t} \quad \textbf{(6.20)}$$

$$D_P = \frac{A}{V} \quad \textbf{(6.21)}$$

$$D_{ort} = \frac{(D_{p1}+D_{p2}+D_{p3})}{3} \quad \textbf{(6.22)}$$

$$V_{MA} = 100 - \frac{D_p x (100-W_b)}{G_{ag}} \quad \textbf{(6.23)}$$

$$V_f = \frac{V_{MA} - V_h}{V_{MA}} x100 \quad \textbf{(6.24)}$$

Aşağıdaki örnekte KTŞ'ye göre doğal agrega malzemesiyle bitümlü temel tabakası için %4 bitüm oranı için 1. numunenin sonuçları verilmiştir.

Doğal agrega karışımının hacim özgül ağırlıkları (G) ve KTŞ'ye göre bitümlü temel için Tip-A gradasyon limitleri kullanılarak bulunan karışım yüzdeleri verilmiştir.

Kaba agrega için : $(G_1) = 2{,}77$ g/cm^3 ; %K = %50,6

İnce Agrega için : $(G_2) = 2{,}81$ g/cm^3 ; %İ = %45,3

Mineral filler için : $(G_3) = 2{,}81$ g/cm^3 ; %M = %4,1

Bitümün özgül ağırlığı : $(G_b) = 1{,}022$ g/cm^3

Bitümün ağırlıkça yüzdesi : $(W_a) = \%4$

Marshall briketinin;

Havadaki ağırlığı (A) = 1247,7 g

Sudaki ağırlığı (C) = 760,1 g

Doygun kuru yüzey ağırlığı (B) = 1260 g

Hacim (V); V = 1260 – 760,1 = 499,9 cm^3

Toplam karışımın özgül ağırlığı (D_p);

D_p = 1247,7 / 760,1 = 2,496 g/cm^3

Toplam karışımın ortalama hacim özgül ağırlığı (D_{Port});

D_{Port} = (2,496 + 2,517 + 2,500) / 3 = 2,504 g/cm^3

Toplam karışımın bitüm yüzdesi (W_b);

W_b = [4 / (4+100)] x 100 = %3,85

Agrega karışımının özgül ağırlığı (G_{ag});

G_{ag} = [100 / [(50,6 / 2,77) + (45,3 / 2,81) + (4,1 / 2,81)]] = 2,79 g/cm^3

Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı (D_t);

D_t = [(100 + 4) / [(100 / 2,82) + (4 / 1,022)]] = 2,64 g/cm^3

Hava boşluğu (V_h);

V_h = [(2,64 – 2,504) / 2,64] x 100 = %5,45

Agregalar arası boşluk (V_{MA});

V_{MA} = 100 – [(2,504 x (100 – 3,85)) / 2,79] = %13,97

Asfalt dolu boşluk (V_f);

V_f = [(13,97 – 5,45) / 13,97] x 100 = %60,99

7. DENEY SONUÇLARI

7.1 Agregaların Fiziksel Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

7.1.1 Elek analizi

Çalışmada kullanılan granülometri "Karayolları Teknik Şartnamesi 2013"de bitümlü temel tabakası için verilen Tip – A gradasyon limitleri kullanılmıştır. Bu granülometri Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 : Bitümlü temel için kullanılan gradasyon limitleri.

Elek Açıklığı (mm)	%Geçen
25	100
19	87,2
12,5	74,4
9,5	65,7
4,75	49,4
2,00	34,9
0,425	15,7
0,18	8,7
0,075	4,1

7.1.2 Özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları

Kaba, ince agreganın ve mineral fillerin özgül ağrılığı ve su emme oranı ASTM C 127'e göre yapılmıştır ve sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Çizelgede gösterildiği üzere EAF cürufunun içinde bulunan demir oranının yüksek olması, özgül ağırlığının doğal agregaya göre daha fazla çıkmasına neden olmaktadır.

Çizelge 7.2 : Kaba, ince agrega ve mineral filler için zahiri özgül ağırlık ve hacim özgül ağırlık değerleri.

Deneyin Adı	Özellik	Değer (g/cm^3)
Doğal Agrega		
Kaba Agrega Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	2,77
	Zahiri Özgül Ağırlık	2,81
İnce Agrega Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	2,81
	Zahiri Özgül Ağırlık	2,85
Mineral Filler Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	2,81
EAF Cürufu		
Kaba Agrega Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	3,24
	Zahiri Özgül Ağırlık	3,46
İnce Agrega Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	3,46
	Zahiri Özgül Ağırlık	3,72
Mineral Filler Özgül Ağırlık Deneyi	Hacim Özgül Ağırlık	3,66

Görüldüğü gibi EAF cürufunu doğal agregadan %20 - 25 oranında daha fazla özgül ağırlığa sahiptir. Bu durum agreganın taşınma maliyetini arttırmaktadır.

Kaba ve ince agreganın su emme oranı Çizelge 7.3'te gösterilmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'e göre bitümlü temelde kaba ve ince agrega için su emme oranı limiti %2,5 olması istenmektedir. EAF cürufunun su emme oranı doğal agregadan %20 - 25 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Bu fazlalık EAF cürufunun pürüzlü bir yapıya sahip olması sebebiyle daha fazla su emdiği yorumu yapılabilir. Deney sonucu doğal agrega ve cürufun su emme oranları şartnamedeki değeri sağlamaktadır.

Çizelge 7.3 : Kaba ve ince agrega için su emme oranları.

Numune	Özellik	Değer (%)
Doğal Agrega		
Kaba Agrega	Su Emme Oranı	0,47
İnce Agrega	Su Emme Oranı	0,48
EAF Cürufu		
Kaba Agrega	Su Emme Oranı	2,00
İnce Agrega	Su Emme Oranı	2,19

7.1.3 Los Angeles deneyi sonuçları

Yol üstyapısında dışarıdan gelecek mekanik etkiler karşısında agreganın dayanımını irdeleyen bu deneyin sonuçları Çizelge 7.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.4 : Los Angeles aşınma değeri.

Numune	Aşınma Değeri (%)	Şartname Limiti (%)
Doğal Agrega	20,6	30
EAF Cürufu	21,3	30

Çizelge 7.4'te gösterildiği gibi doğal agreganın ve EAF cürufunun aşınma değeri TS EN 1097 - 2 şartname limit değerinin altındadır.

7.1.4 Hava tesirine karşı donma-çözme deneyi sonuçları

Yol üstyapısında kullanılacak agreganın sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan malzeme kayıplarının limit yüzdesi Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'te bitümlü temel için %18 olarak belirlenmiştir. Donma-çözme sonuçları Çizelge 7.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.5 : Donma-Çözme deneyi sonuçları.

Numune	Donma-Çözünmedeki Kayıp (%)	Şartname Limiti (%)
Doğal Agrega	0,13	18
EAF Cürufu	2,04	18

7.1.5 Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi sonuçları

Yolda kullanılan malzemede kil topaklar ve ufalanabilir tane oranı yol üstyapısının dayanımı düşürmektedir. Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deney sonucu Çizelge 7.6'te gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında EAF cürufunun kaba ve ince agregada şartname limitini sağladığı ancak doğal ince agreganın şartname limiti altında kaldığı görülmektedir.

Çizelge 7.6 : Kil topakları ve ufalanabilir tane oranı deneyi sonucu.

Numune	Dağılan Tane Oranı (%)	Şartname Limit Değeri (%)
Doğal Agrega		
Kaba Agrega	0,37	0,3
İnce Agrega	1,38	0,3
EAF Cürufu		
Kaba Agrega	0,13	0,3
İnce Agrega	0,26	0,3

7.1.6 Yassılık indeksi deneyi sonuçları

Uzun ince agregaların trafik yükleri altında daha çabuk kırılacağı ve üstyapının stabilitesini olumsuz yönde etkileyeceği için KTŞ 2013'te bitümlü temel tabakası için %30 limit değer verilmiştir (BS 812). Kullandığımız malzemenin yassılık oranı şartname değerini sağladığı Çizelge 7.7'te görülmektedir.

Çizelge 7.7 : Yassılık indeksi deney sonuçları.

Numune	Yassılık İndeksi (%)	Şartname Limiti (%)
Doğal Agrega	12,0	30
EAF Cürufu	7,4	30

7.1.7 Soyulma mukavemeti deneyi sonuçları

Hava veya çevre şartlarından dolayı üstyapıya gelebilecek suyun bitümü agregadan ayırdığı bilinmektedir. Bu soyulma miktarının KTŞ 2013'e göre limit değeri %60'dan fazla olmalıdır. Deneyde soyulma mukavemetini arttırıcı dop malzemesi kullanarak ve dop katkı maddesi içermeyen bitüm kullanarak iki farklı şekilde yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 : Soyulma mukavemeti deneyi sonuçları.

Numune	Doplu Bitüm	Dopsuz Bitüm	Şartname Limit Değeri
Doğal Agrega	%90 - 95	%65 - 75	>%60
EAF Cürufu	%85 - 90	%70 -80	>%60

7.1.8 Organik madde deneyi sonuçları

Agregalarda fazla miktarda organik madde bulunması yol üstyapısında daha sonrasında pürüzlenmeler, çatlaklar ve boşluklar oluşabilir. Yapılan deney sonucunda kullanılan agregalarda herhangi bir organik madde bulunmamıştır.

7.1.9 Metilen mavisi deneyi sonuçları

Metilen mavisi deneyi sonuçları Çizelge 7.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.9 : Metilen mavisi deneyi sonucu.

Numune	Değer (g/kg)	Şartname Limiti
Doğal Agrega	0,5	2,0
EAF Cürufu	0,4	2,0

7.2 Bitüm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

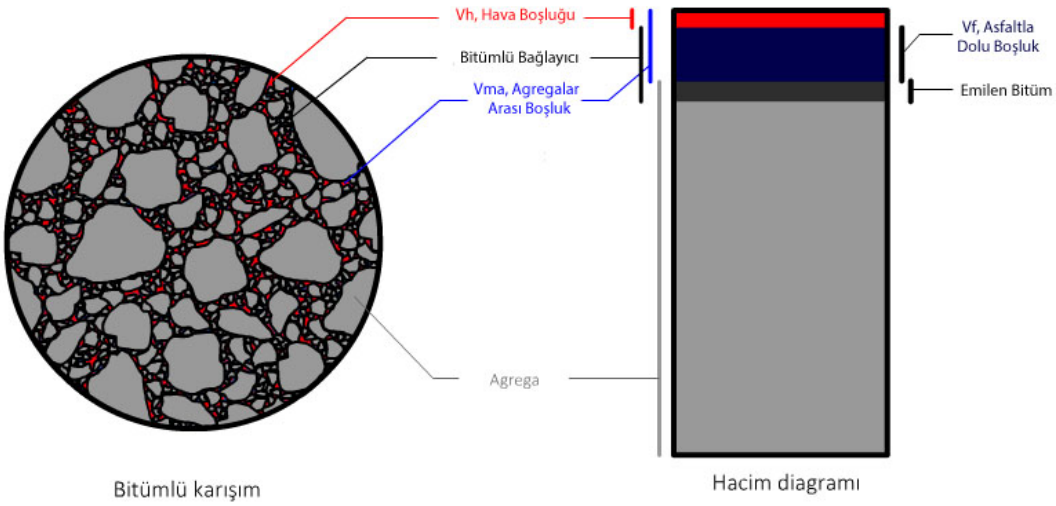
Çalışmada, TÜPRAŞ B 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Bitümün özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerde Çizelge 7.10'daki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.10 : Bitüm deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Deneyin Adı	Deney Sonucu
Penetrasyon (mm)	58,3
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	1,02

7.3 Marshall Deneyi Sonuçları

Marshall deneyi sonuçları yapılan okumalardan ve hesaplanmalardan sonra yapılan hava boşluğu, asfaltla dolu boşluk, agregalar arası boşluk, akma ve düzeltilmiş stabilite değerlerinin bitüm yüzdesi ile karşılaştırılması aşağıda gösterilmiştir. Burada bahsedilen hava boşluğu briketin agrega ve bitüm ile karıştırıldıktan sonra karışım içerisinde kalan hava boşluğunu göstermektedir. Agregalar arası boşluk ise briket içindeki agregaların dışında kalan tüm alanları göstermektedir. Burada agrega içindeki boşluk kastedilmemiştir. Asfaltla dolu boşluk ise agregalarla bitüm ile karıştırıldıktan sonra karışımın tamamından yani briket hacminin tamamından agregaların emdiği bitüm, hava boşluğu ve agreganın hacmi çıkartılarak bulunur. Bununla ilgili açıklama Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

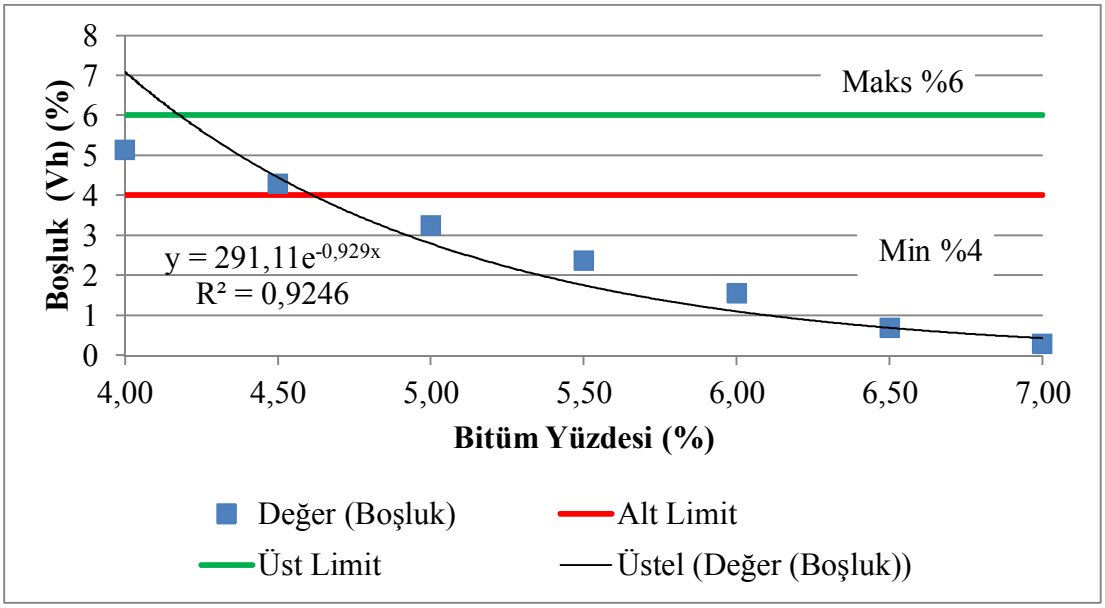


Şekil 7.1 : Marshall deneyi sonuçlarında kullanılan tanımlamalar.

7.3.1 Doğal agreganın marshall deneyi grafikleri

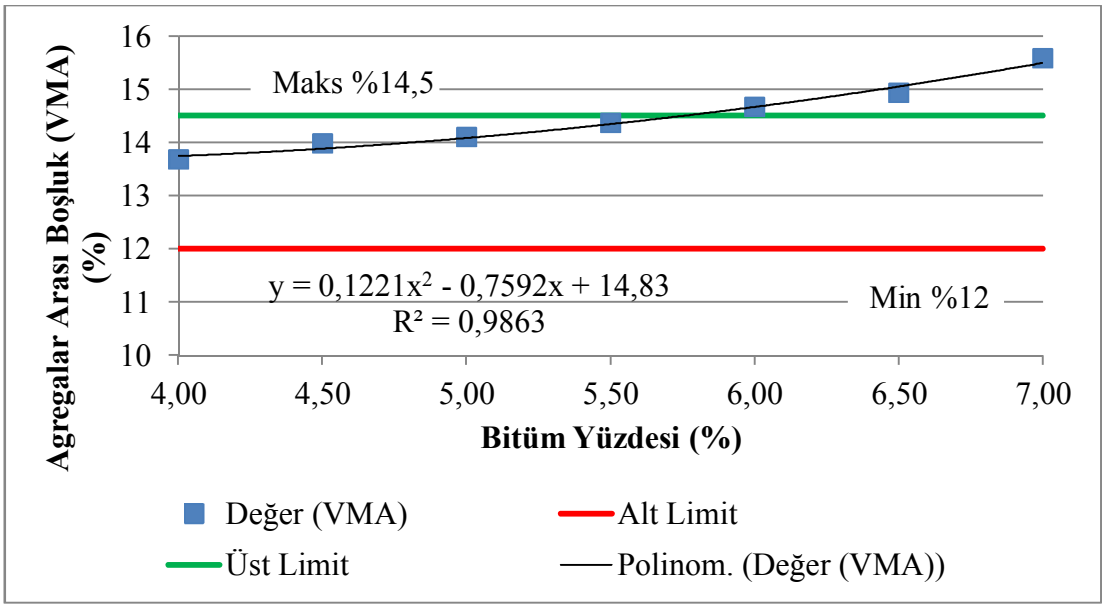
Marshall deneyi sonucunda hesaplanan değerlerin grafik halinde gösterimi aşağıda verilmiştir. Sonuçlara göre boşluk (%) - bitüm oranı (%), agregalar arası boşluk (VMA) (%) - bitüm oranı (%), asfaltla dolu boşluk (Vf) (%) - bitüm oranı (%), pratik özgül ağırlık - bitüm oranı (%), stabilite (kgf) - bitüm oranı (%) ve akma (mm) - bitüm oranı (%) grafikleri çizilmiştir. Optimum bitüm oranı buradaki grafiklerden yararlanarak bulunacaktır.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre boşluk oranının limit değerlerini %4 bitüm ile %4,6 bitüm oranları arası sağlamıştır. Şekil 7.1'de boşluk (%) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



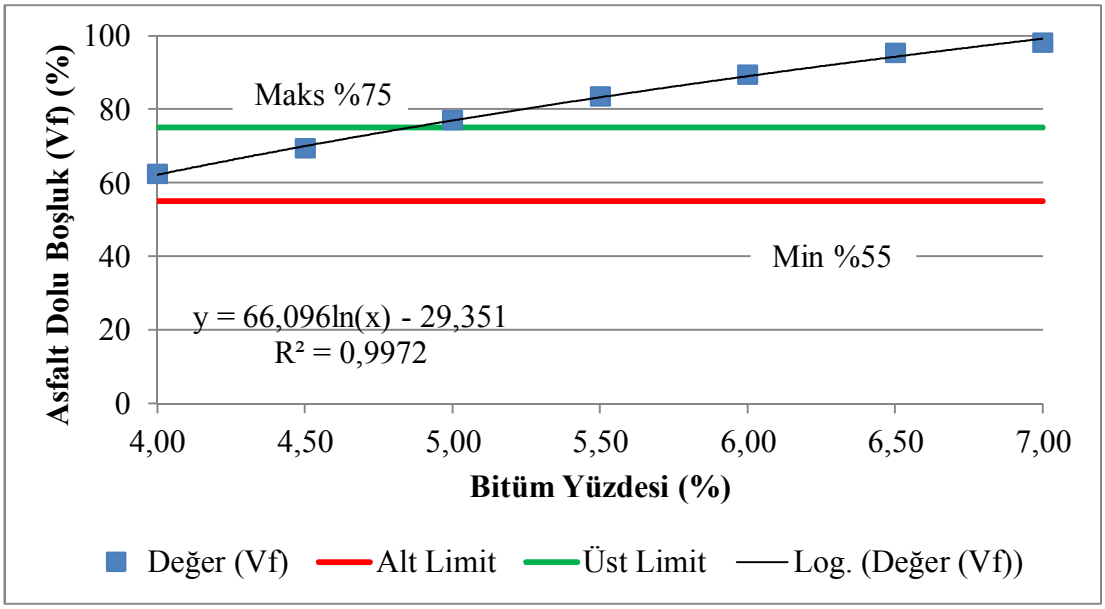
Şekil 7.2 : Boşluk (V_h) - bitüm oranı grafiği.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre agregalar arası boşluk oranının limit değerlerini %4 bitüm ile %5,8 bitüm oranları arası sağlamıştır. Şekil 7.2'de agregalar arası boşluk (VMA) (%) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



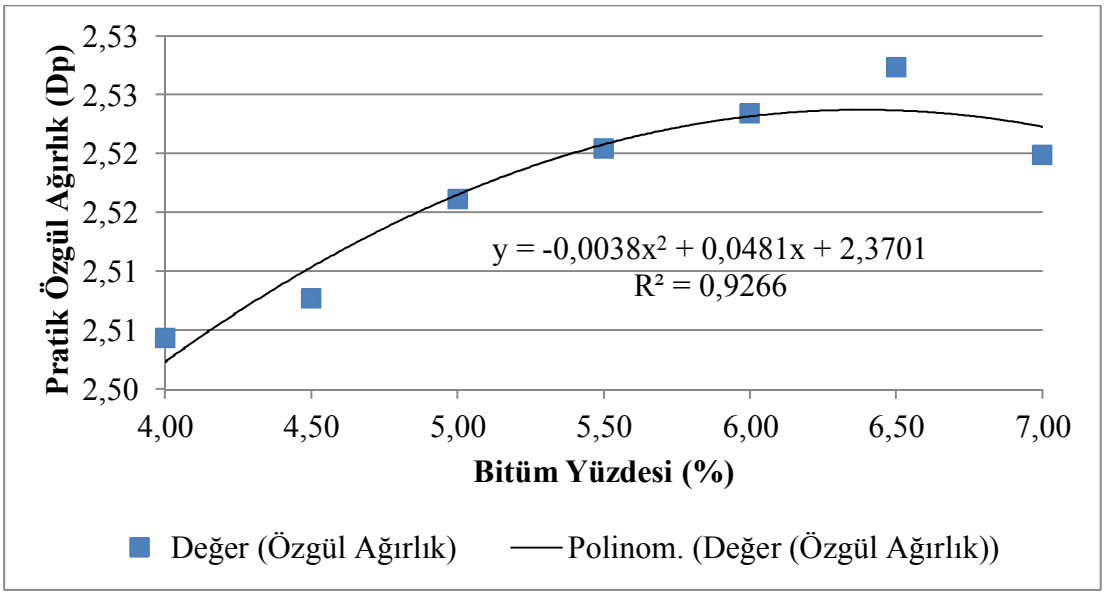
Şekil 7.3 : Agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm oranı grafiği.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre asfalt dolu boşluk oranının limit değerlerini %4 bitüm ile %4,9 bitüm oranları arası sağlamıştır. Şekil 7.3'te asfaltla dolu boşluk (V_f) (%) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



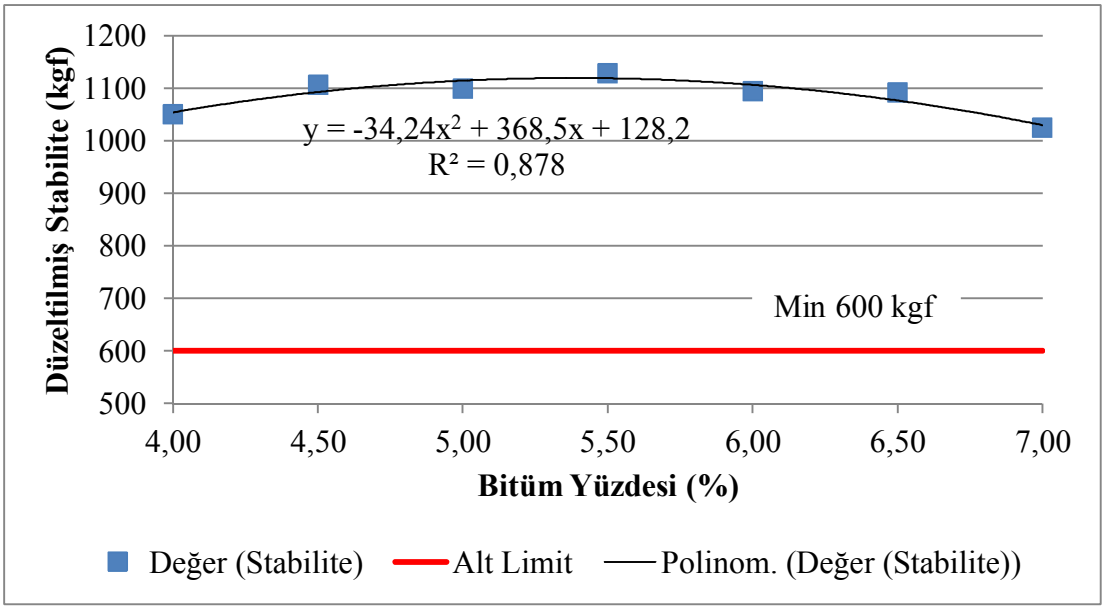
Şekil 7.4 : Asfaltla dolu boşluk (V_f) – bitüm oranı grafiği.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu her bir bitüm aralığı için pratik özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Şekil 7.4'te pratik özgül ağırlık - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



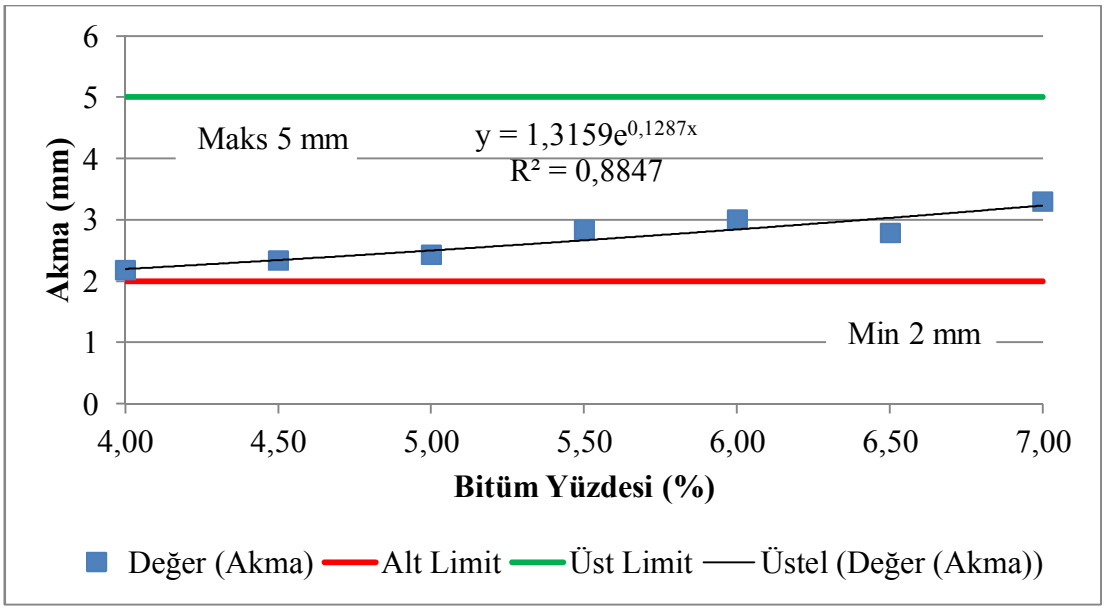
Şekil 7.5 : Pratik özgül ağırlık – bitüm oranı grafiği.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre stabilite limit değerlerini deneylerde kullanılan bütün bitüm oranları sağlamıştır. Şekil 7.5'te düzeltilmiş stabilite (kgf) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.6 : Düzeltilmiş stabilite – bitüm oranı grafiği.

Doğal agregada yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre akma limit değerlerini deneylerde kullanılan bütün bitüm oranları sağlamıştır. Şekil 7.6'da akma(mm) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.7 : Akma – bitüm oranı grafiği.

7.3.2 Doğal agreganın optimum bitüm yüzdesi

Oluşturulan grafikler üzerinden KTŞ'de belirtilen boşluk oranı limit değerleri baz alınarak optimum limit belirlenmiştir. Burada KTŞ için bitümlü temelin boşluk oranı limitleri minimum 4, maksimum 6 olarak kaydedilmiş ve bunun aritmetik ortalaması alınarak (5) optimum bitüm değerleri bulunmuştur. Şekil 7.1'de görülen boşluk oranı – bitüm yüzdesi grafiğinde denklemde "y" değeri 5 olacak şekilde "x" değeri bulunmuştur ve optimum bitüm oranı %4,37 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra diğer grafiklerdeki eğri denklemlerinde bulunan "x" yerine optimum bitüm oranı olarak bulduğumuz %4,37 değeri yazılarak, optimum bitüm oranı için agregalara arası boşluk (VMA), asfalt dolu boşluk (Vf), pratik özgül ağırlık, düzeltilmiş stabilite ve akma değerleri bulunmuştur. Çizelge 7.11'de sonuçlar gösterilmektedir.

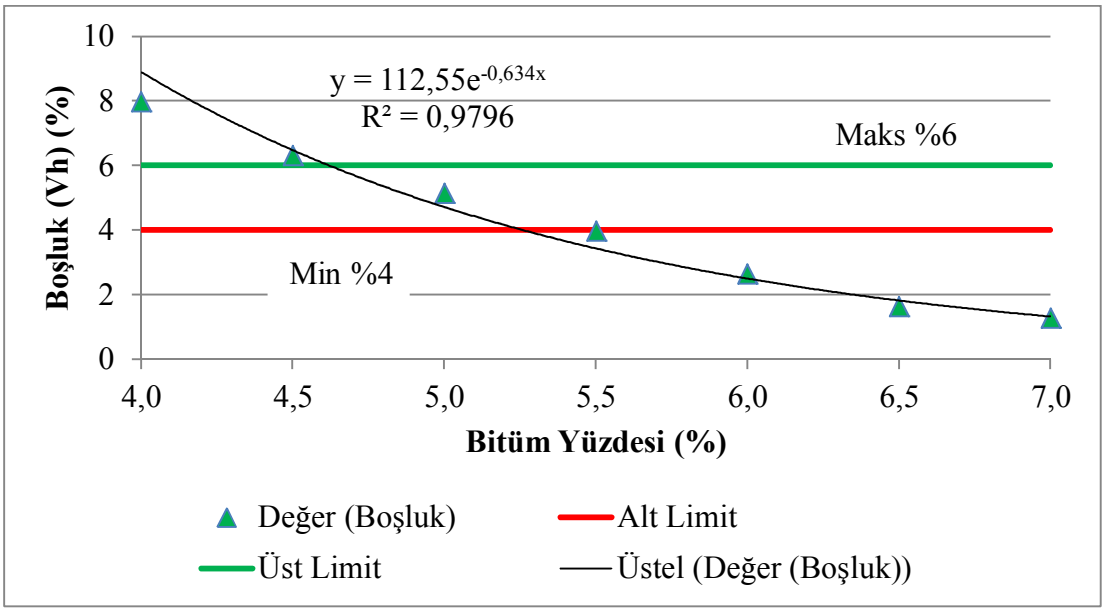
Çizelge 7.11 : Doğal agreganın optimum bitüme göre hesaplanan değerler ve şartname limitleri.

Parametreler	Optimum Bitüm (%)	Değer	Şartname Aralığı
Pratik Özgül Ağırlık (g/cm^3)	4,37	2,51	
Marshall Stabilitesi (kgf)	4,37	1085,00	>600
Bitümle Dolu Boşluk (Vf), %	4,37	68,20	55 - 75
Boşluk (Vh) %	4,37	5,00	4 - 6
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	4,37	13,85	12 - 14,5
Akma (mm)	4,37	2,01	2 - 5

7.3.3 EAF cürufunun marshall deneyi grafikleri

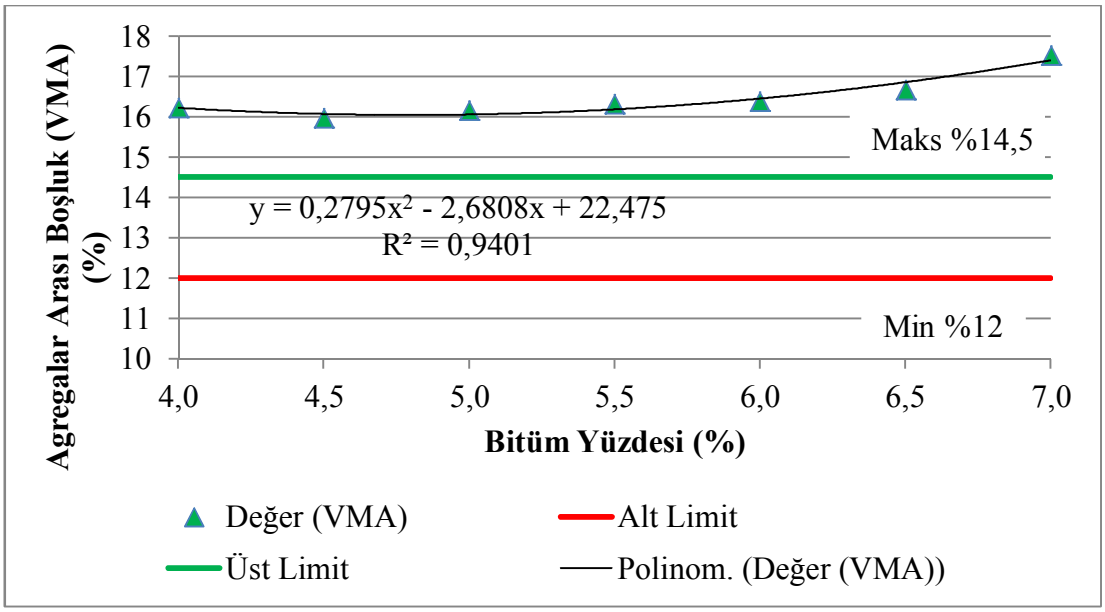
Marshall deneyi sonucunda hesaplanan değerlerin grafik halinde gösterimi aşağıda verilmiştir. Sonuçlara göre % boşluk - % bitüm oranı, % agregalar arası boşluk (VMA) - % bitüm oranı, % asfaltla dolu boşluk (Vf) - % bitüm oranı, pratik özgül ağırlık - %bitüm oranı, stabilite - %bitüm oranı ve akma - %bitüm oranı grafikleri çizilmiştir. Optimum bitüm oranı buradaki grafiklerden yararlanarak bulunacaktır.

Cürufta yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre boşluk oranının limit değerlerini %4,7 bitüm ile %5,3 bitüm oranları arası sağlamıştır. Şekil 7.7'de % boşluk - % bitüm oranı grafiği verilmiştir.



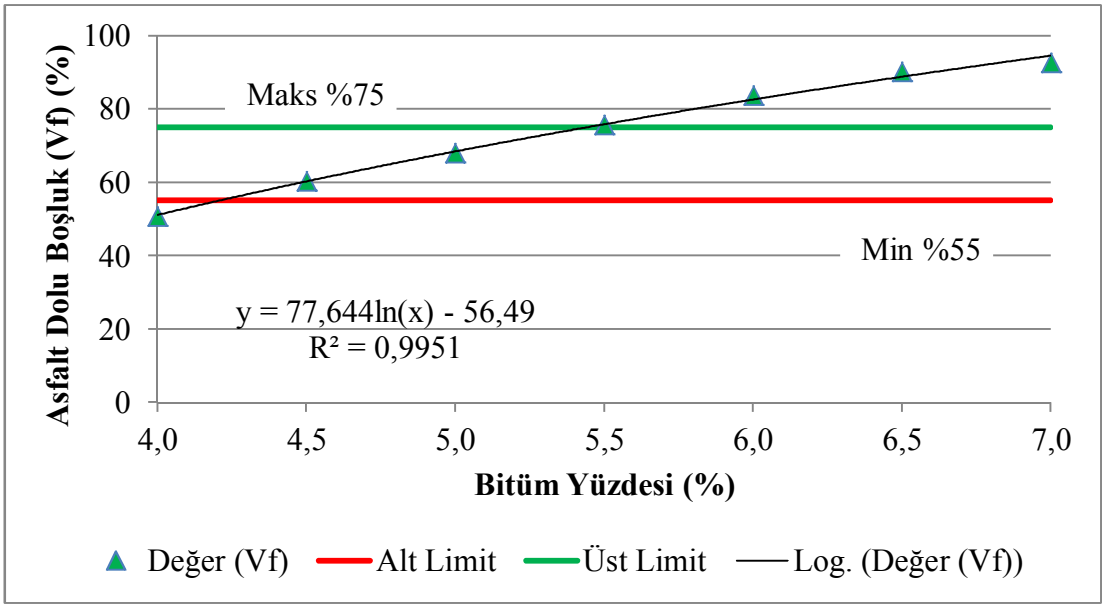
Şekil 7.8 : Boşluk (V_h) - bitüm oranı grafiği.

Cürufta yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre agregalar arası boşluk oranının limit değerlerini hiçbir bitüm oranı sağlamamıştır. Şekil 7.8'de agregalar arası boşluk (%) (VMA) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



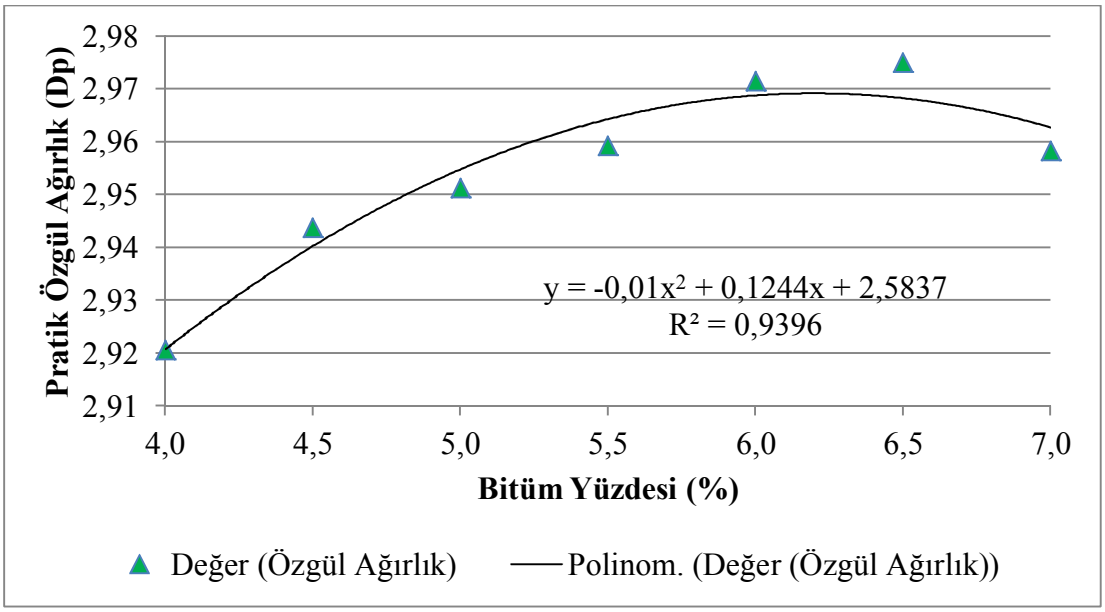
Şekil 7.9 : Agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm oranı grafiği.

Cürufta yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre asfalt dolu boşluk oranının limit değerlerini %4,3 bitüm ile %5,5 bitüm oranları arası sağlamıştır. Şekil 7.9'da asfaltla dolu boşluk (V_f) (%) - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



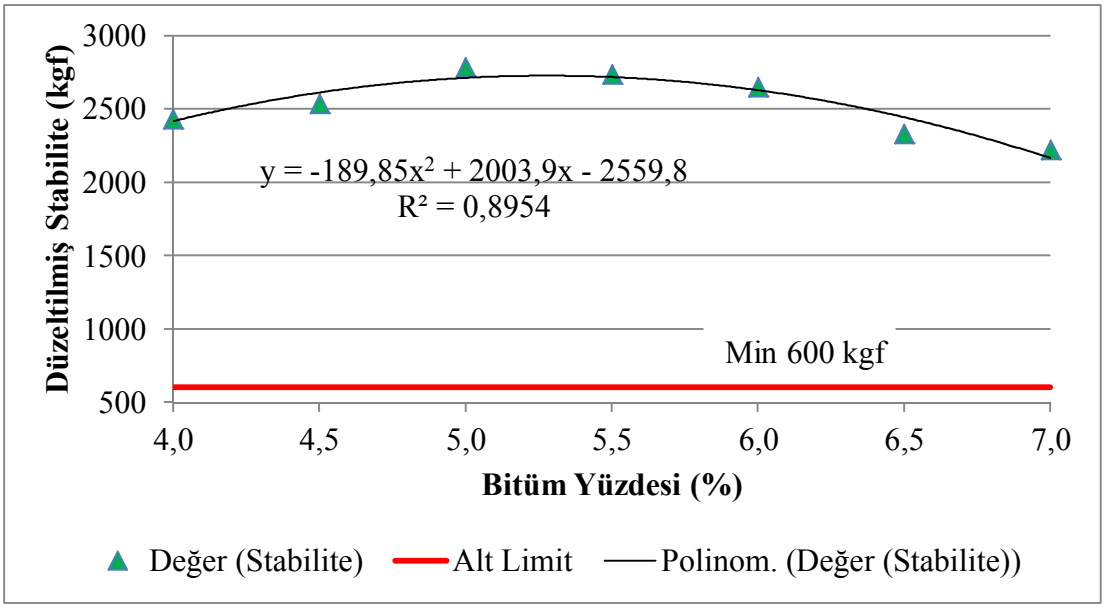
Şekil 7.10 : Asfaltla dolu boşluk (V_f) – bitüm oranı grafiği.

Cürufta yapılan deneyler sonucu her bir bitüm aralığı için pratik özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Şekil 7.10'da pratik özgül ağırlık - bitüm oranı (%) grafiği verilmiştir.



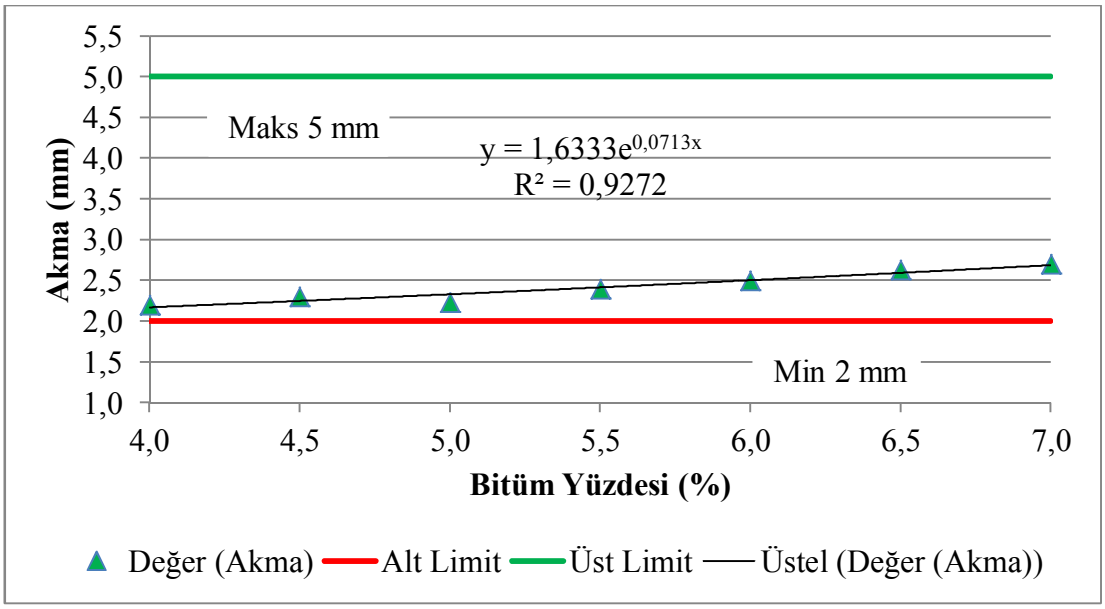
Şekil 7.11 : Pratik özgül ağırlık – bitüm oranı grafiği.

Cürufta yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre asfalt dolu boşluk oranının limit değerlerini kullanılan bütün bitüm oranları sağlamıştır. Şekil 7.11'te düzeltilmiş stabilite (kgf) - bitüm oranı grafiği (%) verilmiştir.



Şekil 7.12 : Düzeltilmiş stabilite – bitüm oranı grafiği.

Cürufta yapılan deneyler sonucu KTŞ'ye göre akma oranının limit değerlerini kullanılan bütün bitüm oranları sağlamıştır Şekil 7.12'de akma (mm) - bitüm oranı grafiği (%) verilmiştir.



Şekil 7.13 : Akma – bitüm oranı grafiği.

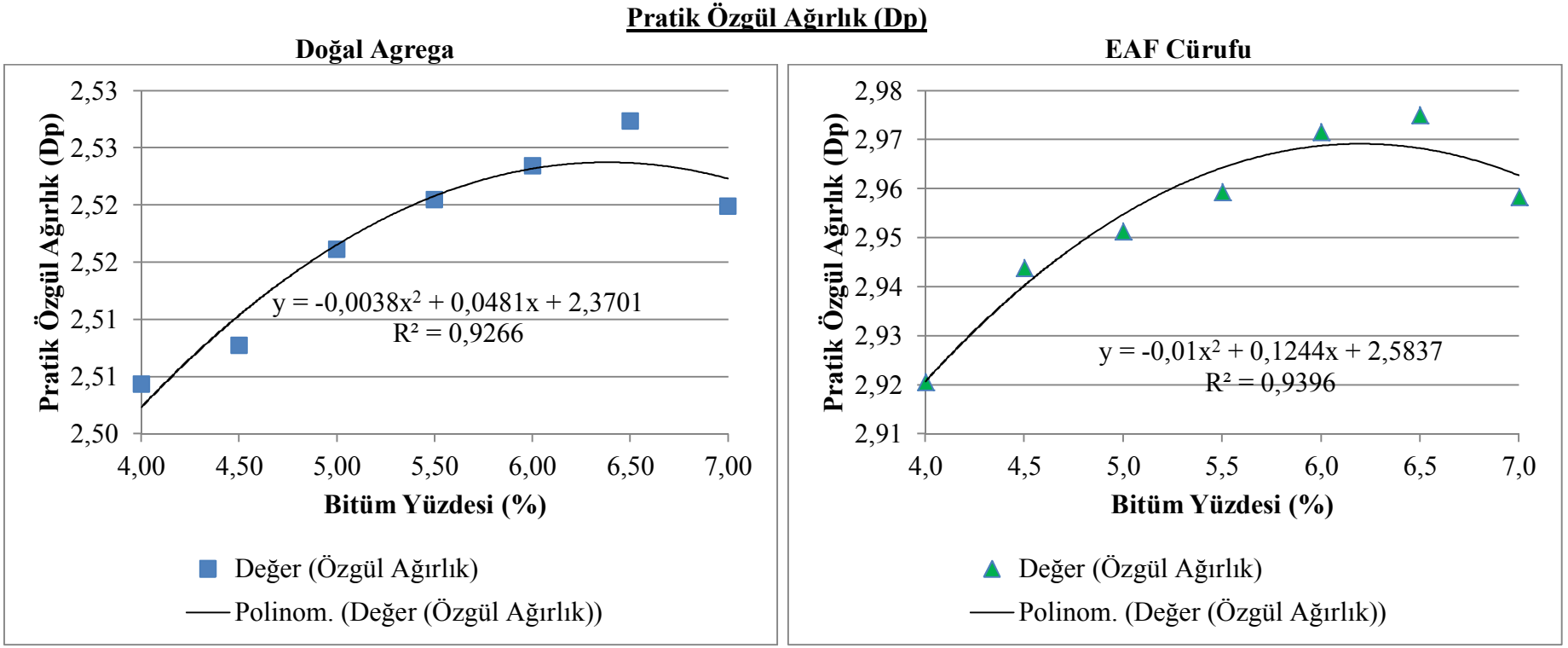
7.3.4 EAF cürufunun optimum bitüm yüzdesi

Oluşturulan grafikler üzerinden KTŞ'de belirtilen boşluk oranı limit değerleri baz alınarak optimum limit belirlenmiştir. Burada KTŞ için bitümlü temelin boşluk oranı limitleri minimum 4, maksimum 6 olarak kaydedilmiş ve bunun aritmetik ortalaması alınarak (5) optimum bitüm değerleri bulunmuştur. Şekil 7.7'de görülen boşluk oranı – bitüm yüzdesi grafiğinde denklemde "y" değeri 5 olacak şekilde "x" değeri bulunmuştur ve optimum bitüm oranı %4,91 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra diğer grafiklerdeki eğri denklemlerinde bulunan "x" yerine optimum bitüm oranı olarak bulduğumuz %4,91 değeri yazılarak, optimum bitüm oranı için agregalara arası boşluk (VMA), asfalt dolu boşluk (Vf), pratik özgül ağırlık, düzeltilmiş stabilite ve akma değerleri bulunmuştur. Çizelge 7.12'de sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 7.12 : Cürufun optimum bitüme göre hesaplanan değerler ve şartname limitleri.

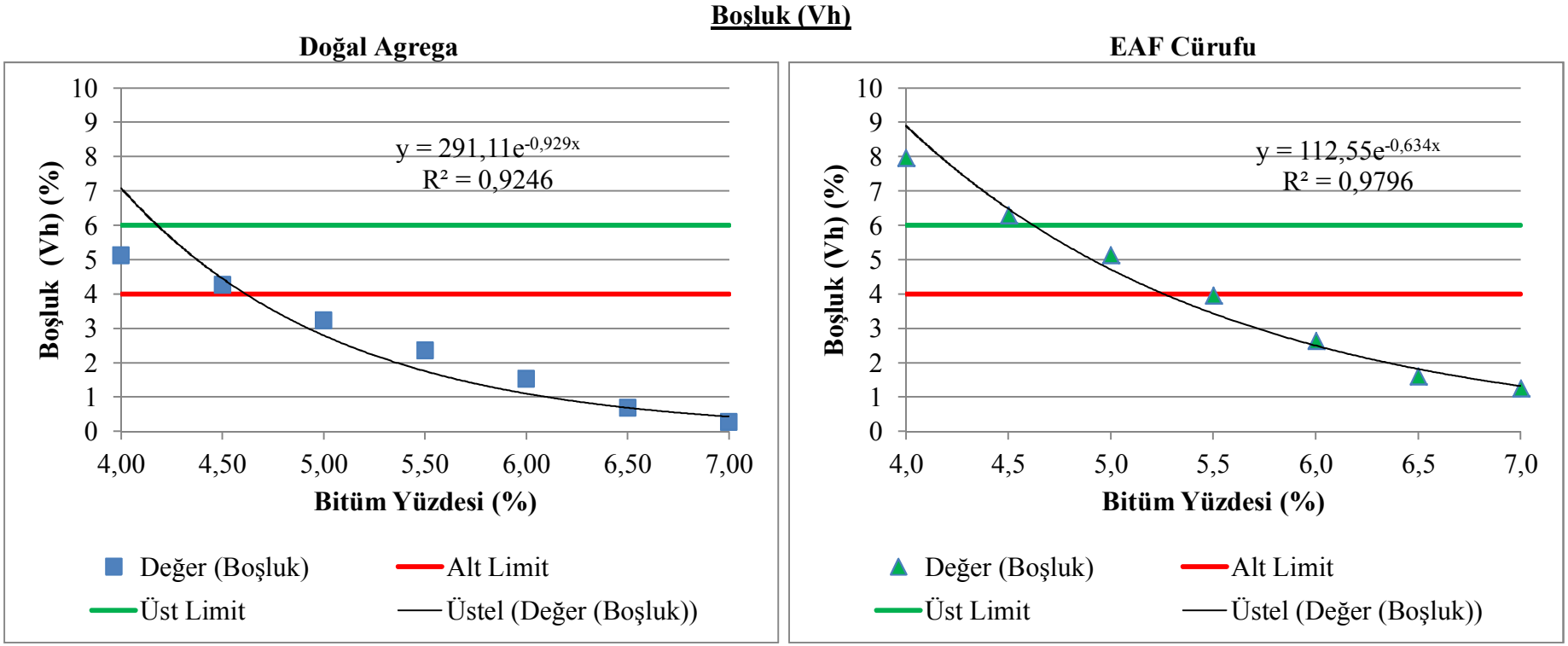
Parametreler	Optimum Bitüm (%)	Değer	Şartname Aralığı
Pratik Özgül Ağırlık (g/cm^3)	4,91	2,95	
Marshall Stabilitesi (kgf)	4,91	2702,65	>600
Bitümle Dolu Boşluk (Vf), %	4,91	67,09	55 - 75
Boşluk (Vh) %	4,91	5,00	4 - 6
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	4,91	16,05	12 - 14,5
Akma (mm)	4,91	2,32	2 - 5

7.3.5 Grafiklerin karşılaştırılması



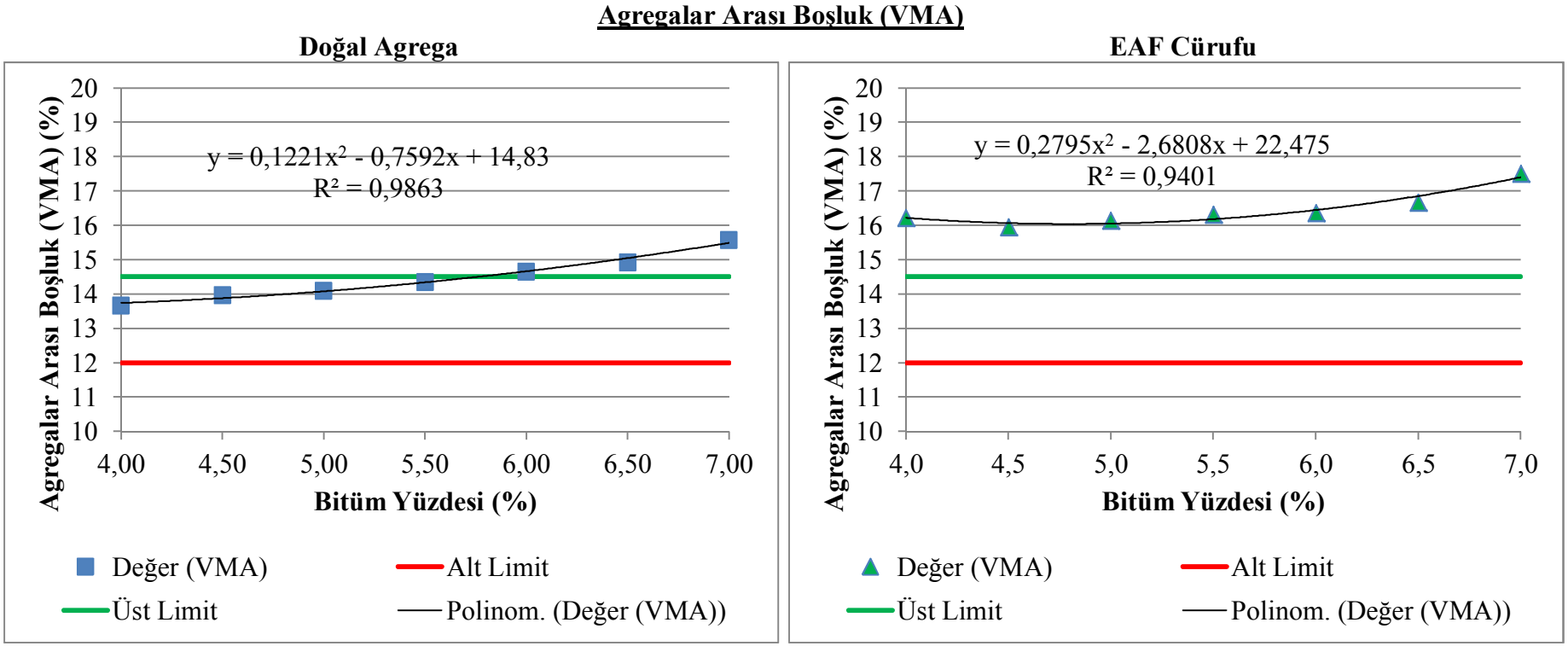
Şekil 7.14 : Doğal agrega ile EAF cürufunun pratik özgül ağırlıkları – bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.13'te görüldüğü gibi EAF cürufunun özgül ağırlığı doğal agregadan fazladır.



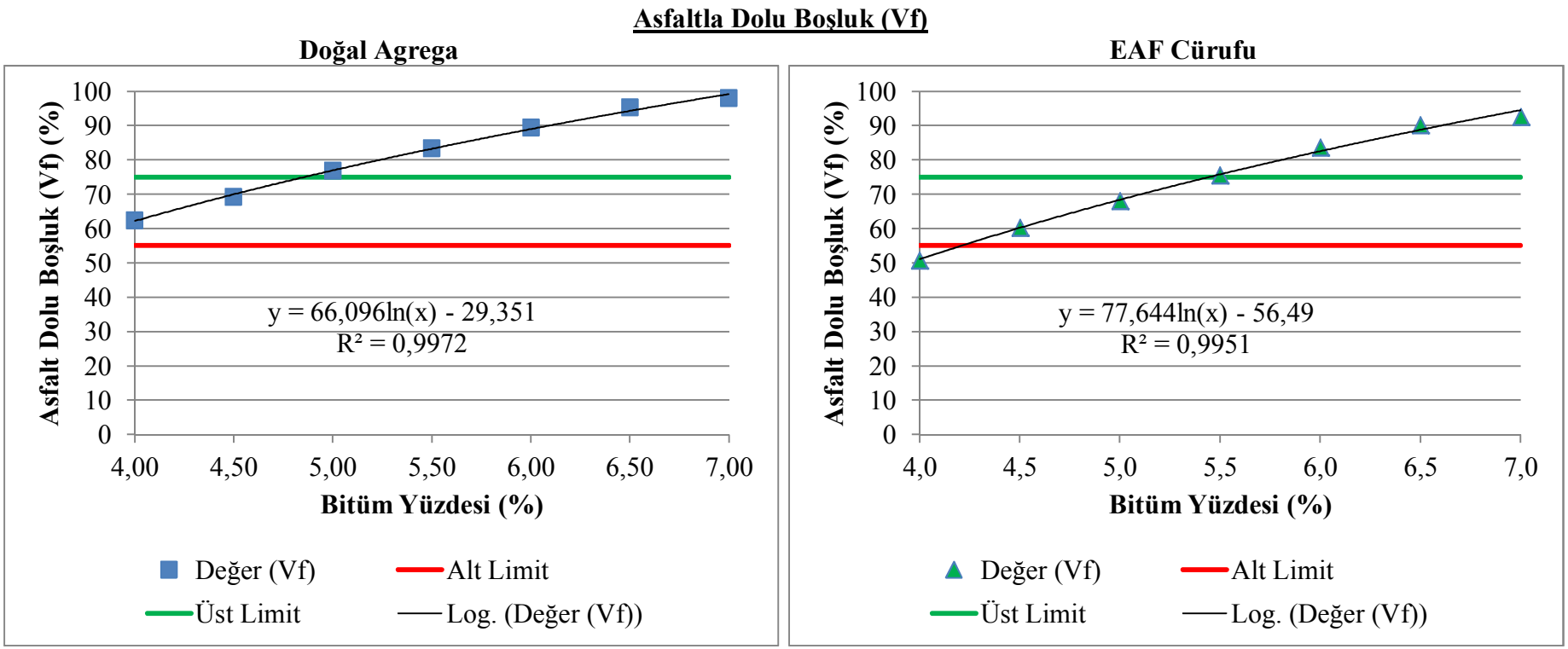
Şekil 7.15 : Doğal agrega ile EAF cürufunun boşluk (V_h) – bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.14'te görüldüğü gibi EAF cürufunun boşluk yüzdesi doğal agregadan daha fazladır.



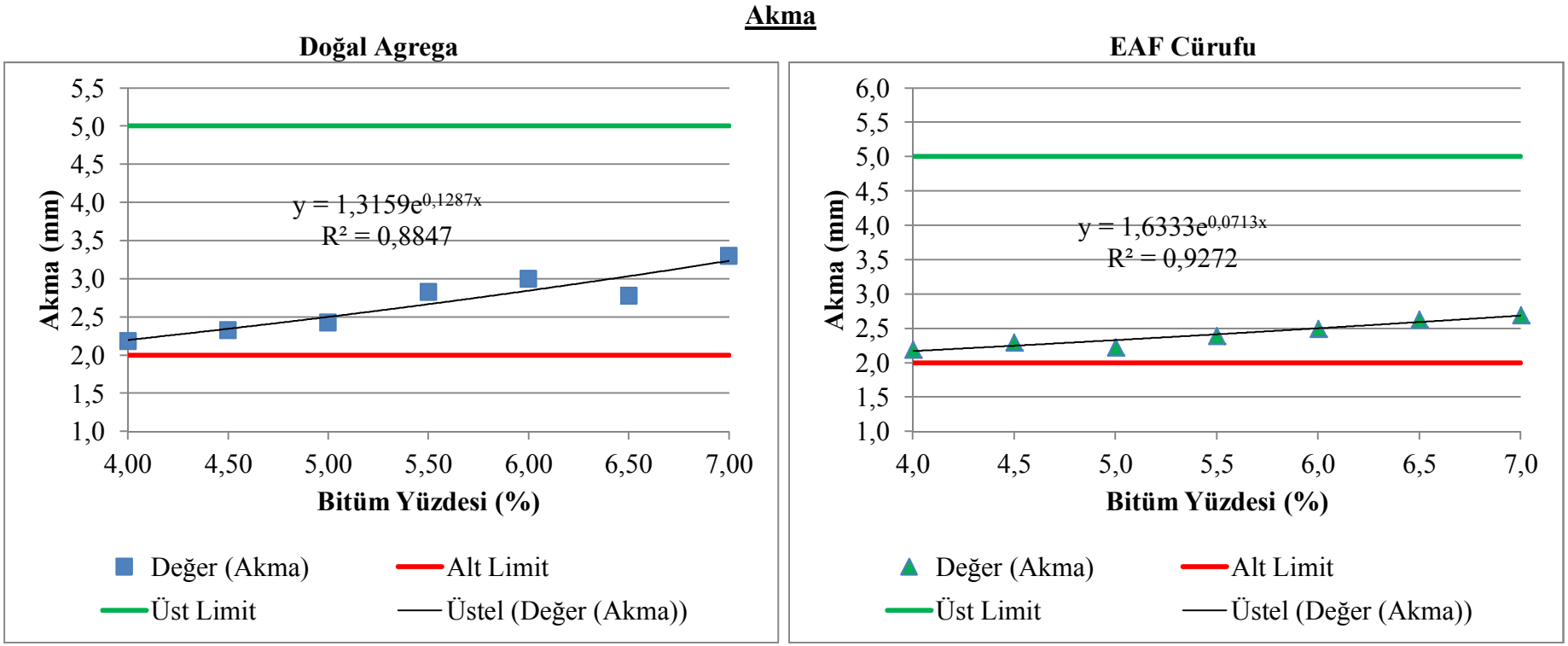
Şekil 7.16 : Doğal agrega ile EAF cürufunun agregalar arası boşluk (VMA)– bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.15'te görüldüğü gibi EAF cürufunun agregalar arası boşluk yüzdesi doğal agregadan daha fazladır. Ayrıca hiçbir bitüm yüzdesinde EAF cürufu KTŞ 2013'te yer alan sınır değeri sağlayamamıştır.



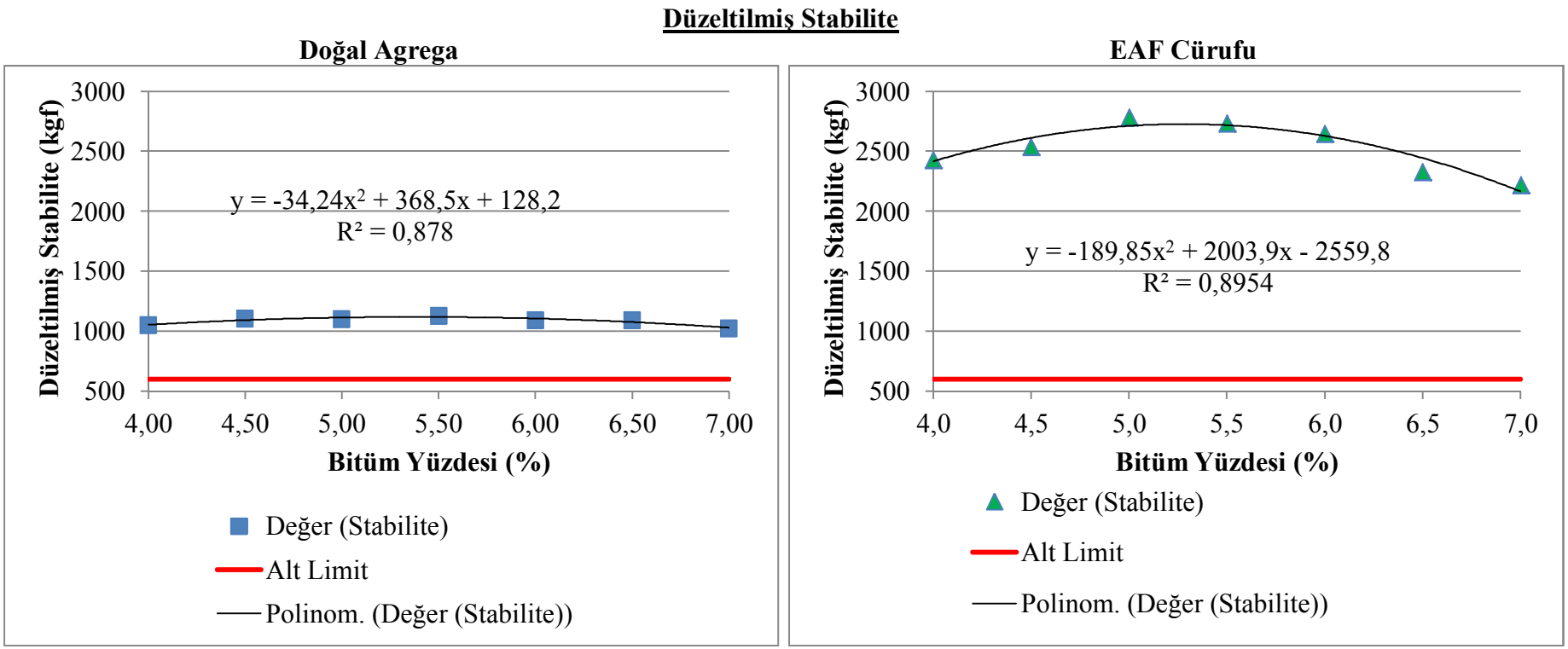
Şekil 7.17 : Doğal agrega ile EAF cürufunun asfaltla dolu boşluk (V_f) – bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.16'da görüldüğü gibi doğal agreganın asfaltla dolu boşluk yüzdesi EAF cürufundan daha fazladır.



Şekil 7.18 : Doğal agrega ile EAF cürufunun akma – bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.17'de görüldüğü gibi doğal agreganın akma değeri EAF cürufundan biraz fazladır.



Şekil 7.19 : Doğal agrega ile EAF cürufunun düzeltilmiş stabilite – bitüm yüzdeleri.

Şekil 7.18'de görüldüğü gibi EAF cürufunun düzeltilmiş stabilite değeri doğal agregadan daha fazladır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, EAF cürufunun esnek üstyapının bitümlü temel tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada doğal agreganın ve EAF cürufunun fiziksel özellikleri KTŞ 2013'de belirtilen standartlara uygun deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Fiziksel özellikleri belirlenen agregalarda Marshall tasarımı yapılarak doğal agrega ile cürufun kıyaslanması yapılmıştır. Çalışmada uygulanan bütün deneyler KTŞ 2013 esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Doğal agrega ve EAF cürufu üzerinde yapılan Marshall metodunun sonuçları aşağıda incelenmiştir.

Marshall deneyi ve agrega deneyleri sonucu elde edilen verilere bakıldığında;

- Doğal agregada ve EAF cürufunda bitüm oranı arttıkça özgül ağırlık değerinin artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.
- Özellikle iç anadoluda ve doğu anadoluda gece gündüz farkının bulunması ve don olaylarının fazla olması sebebiyle ülkemizde yapılacak olan yolların içerisindeki boşluk oranı önemli bir parametredir. KTŞ 2013'te bitümlü temel tabakası için boşluk oranı sınır değeri %4 – 6 arasındadır. Yapılan deneyde EAF cürufu bulunan brikette boşluk oranı doğal agrega ile yapılan brikete oranla daha fazladır. EAF cürufunun bu etkisinin gözenekli yapısının neden olduğu düşünülmektedir. Donma – çözülme deneyi sonucu EAF cürufunun değeri %2,08 olarak bulunmuştur bu değer de şartname sınır değeri olan %18'in oldukça altındadır. İçerisinde boşluk oranı doğal agregaya göre fazla olan EAF cürufu donma – çözme deneyi sonuçlarına bakarak olumlu yorum yapabiliriz. Ancak şartname sınır değerlerini doğal agrega %4 - %4,6 bitüm oranları arasında sağlarken, EAF cürufu %4,6 - %5,3 arasında sağlamaktadır. Yani şartname boşluk oranını sağlamak için EAF cürufunda doğal agregaya göre daha fazla bitüm gerekmektedir. Doğudaki ve güneydeki komşu ülkelerimizin hemen hepsi petrol üreten ve satan eden ülkeler olmalarına

karşın ülkemizin petrol ithal ettiği göz önüne alındığında yol yapımında kullanılacak bitüm miktarının artması yol yapım maliyetlerini arttırmaktadır.

- Agregalar arası boşluk oranı KTŞ 2013'te bitümlü temel için yer alan sınır değer %12 - %14,5 değerini doğal agregada da %4 - %5,6 bitüm oranlarında sağlarken EAF cürufu hiçbir bitüm oranında sınır değerleri sağlayamamıştır.
- Asfaltla dolu boşluk oranının fazla olması üstyapıya gelecek olan suyun yol tabakalarının içerisine girerek yol üstyapısında bozulmalara neden olacağından şartname sınır değerlerini sağlamalıdır. Bu değer KTŞ 2013'e göre bitümlü temel tabakası için %55 - 75 arasındadır. Şartname sınır değerlerini doğal agrega %4 - %4,9 bitüm oranı aralığında sağlarken EAF cürufu %4,2 - %5,5 bitüm oranı aralığında sağlamaktadır. Bu göstermektedir ki şartname sınır şartlarını sağlamak için EAF cürufu agregasında daha fazla bitüm oranı gerekmektedir. Doğal agreganın asfalt dolu boşluk oranı EAF cürufunda olduğu gibi bitüm oranı arttıkça artmaktadır. Fakat genele bakıldığı zaman doğal agreganın asfaltla dolu boşluk oranı EAF cürufundan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın EAF cürufunun gözenekli yapısından olduğu düşünülmektedir. Çünkü karışım esnasında bitüm ilk önce agrega yüzeyindeki boşluklara doldurduktan sonra agregalar arasındaki boşluğu dolduracaktır.
- Üstyapı tabakasının trafik yükleri altında deforme olmasına karşı mukavemetinin bir göstergesi olan akma değeri doğal agrega içinde EAF cürufu içinde 2 – 5 mm şartname sınır değerini sağlamaktadır. Genele bakıldığında EAF cürufunun akma değeri doğal agregayla kıyasla 0,5 mm daha az akma göstermektedir. Bunun yanında EAF cürufu, doğal agregaya göre daha fazla stabilitesi yüksek çıkmıştır. Bu da göstermektedir ki EAF cürufu, doğal agregaya kıyasla mukavemeti daha yüksek bir bitümlü temel tabakası vermektedir.
- Doğal agregada stabilitenin bitüm oranıyla birlikte arttığı ve %5,5 bitümde maksimum değerine (1128,4 kgf) ulaştıktan sonra gerileme eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bunun yanında stabilitenin en düşük olduğu bitüm yüzdesi %7'deki değeri 1024,4 kgf'tur. Bu değer bile şartname sınır değeri olan 600 kgf'un fazlaca üzerindedir. EAF cürufunda da stabilitenin bitüm oranıyla birlikte arttığı ve %5 bitüm oranında maksimum değerine ulaştıktan sonra

gerileme eğilimi göstermiştir. %7 bitüm oranında stabilitenin en düşük olduğu değere (2222,7 kgf) inilmiştir. Bu değerde şartname sınır değeri olan 600 kgf değerinin neredeyse dört katı değerinde olduğundan yapılan deneyde stabilite konusunda herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

EAF cürufunun bitümlü temel tabakasıyla kullanımına ilişkin öneriler;

- Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde EAF cürufunun bitümlü temel tabakasında doğal agrega yerine kullanımı geri dönüşüm sağladığı için olumlu olarak yorumlayabiliriz. Ülkemizde demir çelik sektörünün ürettiği atık olan EAF cüruflarının inşaat sektöründe değerlendirilmesi hem çevreci bir yaklaşım olmakta hem de doğal agrega kullanımını azalttığı için ülkemizin doğal kaynaklarını koruyacaktır. Öte yandan bakıldığında deney sonuçları göstermektedir ki EAF cürufunun agrega olarak kullanımı doğal agregaya kıyasla daha fazla bitüm miktarı gerektirmektedir. Bu da petrol ürünü olan bu malzemenin daha fazla ithal edilmesi anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra EAF cürufunun özgül ağırlığının doğal agregaya göre fazla olması sebebiyle taşıma maliyetleri daha fazla olan EAF cürufları, taşıma maliyetlerini azaltmak için elektrik ark fırını üretim tesisleri olan bölgelerde kullanılabilir. EAF cürufunun bulunan bölgeye göre ekonomik olarak kullanımının bir fizibilite çalışması ile belirlenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.
- Yol tabakalarının diğer kısımlarında doğal agregayla kıyaslayarak veya doğal agregayla karıştırılarak deneyler yapılabilir. Bunun yanında şehir içi yollarda sıklıkla yapılan bakım onarım çalışmalarında doğal agrega yerine cürufun kullanılabilirliği incelenebilir. Bu çalışma sonuçlarına göre demir – çelik üretimi sırasında açığa çıkan cüruflar için bir yasa, yönetmelik ve şartname hazırlanarak EAF cürufunun değerlendirilmesiyle ilgili önemli bir adım atılmış olacaktır. Bu adım devletin özel sektörü teşvikiyle desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

[1] **Yayla, N.,** (2006), *Karayolu Mühendisliği,* Birsen Yayınevi, İstanbul.

[2] **Ilıcalı, M. (**1988), *Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanabilirliğinin Araştırılması* (Doktora Tezi). YTÜ, İstanbul.

[3] **Yılmaz A.,** (2008), *Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufları ile silis dumanının yol üstyapısında kullanımının incelenmesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[4] **Ilıcalı, M.,** (2001), *Asfalt ve Uygulamaları*. 280s. İstanbul.

[5] **Ağar E., Sütaş İ., Öztaş G.,** (1998), *Beton Yollar*, s.1-2, İTÜ Yayınları, İstanbul.

[6] **Yeğinobalı, A.,** (2009), *Niçin Beton Yol,* Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

[7] **Karaşahin, M.** (1993), *Resillient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements,* Doktora Tezi, Nottingham Üniversitesi, Nottingham.

[8] **Tunç, A.,** (2007), *Yol Malzemeleri* (Agrega, Asfalt, Bitümlü Karışımlar, Beton, Zemin), ve Uygulamaları, Nobel Yayınları 2. Baskı, Ankara.

[9] **İsfalt**, (2002), Asfalt Enstitüsü El Kitabı Serisi, "*Asfalt El Kitabı*", Sistem Ofset, İstanbul.

[10] **Umar, F. ve Ağar, E.** (1991), *Yol Üstyapısı*. İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.

[11] **Mehmet Saltan, F.Selcan Fındık ,** *Geniş Tabanlı Ve Çift Tekerlekli Ağır Taşıtların Karayolu Esnek Üstyapıları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta.

[12] **Turgay Yılmaz,** (2011), *Karayolu Üstyapı Yönetim Sistemi Ve Kocaeli İli Baş iskele İlçesi Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İstanbul.

[13] **Erkan Hanlı**, (2009), *Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar Ve Değerlendirmesi*, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.

[14] **Road Research Laboratory,** (1970), *A guide to the structural design of pavements for new roads*. Road Note 29. London: H M Stationery Otice.

[15] **FAA**, (1995), *Airport Pavement Design and Evaluation* AC 150/5320-6D.

[16] **Kaya, A. Ö.,** (2014), *Esnek Üstyapı Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi) İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[17] **Orhan F.,** (2012), *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü.

[18] **Türk asfalt müteahhitleri derneği bülteni**, (2014) Mart - Nisan, sayı:2.

[19] **Arslan F.,** (2014), *Taş Mastik Asfalt Karışımlarında İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük-Kumtaşı ve Karatepe-Bazaltı Kullanımının İncelenmesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[20] **Çetin, S.,** (2007), *Afyonkarahisar Bölgesi Volkanik Kayaçların Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarında Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

[21] **Karataş, S.A.,** (2014), *Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[22] **Karayolu Teknik Şartnamesi.** (2013), *KGM Yayını*, Ankara.

[23] **TOBB Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu,** (2014) TOBB.

[24] **Demir Çelik Sektör Raporu 2014,** *Doğaka*, Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı.

[25] **Demir Çelik Çalışma Raporu,** (2014-2018), T.C. Kalkınma Bakanlığı, Onuncu Kalkınma Planı.

[26] **International Iron And Steel Instutie**. Alındığı tarih: 02.03.2015. (Adres: www.worldsteel.org)

[27] **Turkish Yatırım,** (2014) *Demir Çelik Sektörünü Değerlendirmemiz 2015*, İstanbul.

[28] **Demir-Çelik Sektörü Raporu,** (2013) T.C. Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı.

[29] **Erişir, E**. (2013) Çeliklerde Malzeme Bilimi ve Son Gelişmeler. *Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları*. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

[30] **Kahraman F.,** Ders Notları, ,Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.

[31] **Yıldız, K.** (2013). *Ham Demirden Çelik Üretimi*. Demir Çelik Metalürjisi Ders Notları . Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

[32] **Demir-Çelik Üretimi**, *Endüstri Mühendisliği Ders Notları*, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

[33] **Avrupa Birliği.** (2007). *Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (IPPC) Demir ve Çelik Üretiminde En İyi Teknolojiler Referans Dokümanı*. Demir Çelik Üreticileri Derneği, Ankara.

[34] **European Commission.** (2001). *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel*. Sevilla, Spain: Expo-WTC.

[35] **Yılmaz, A. ve Sütaş, Ş**., (2008), *Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı*, İMO Teknik Dergi, 4455-4470, Yazı 294.

[36] **National Slag Association**, http://www.nationalslag.org/steelslag.htm (Erişim tarihi: 05.03. 2015).

[37] **Altan, E.,** (2001) *Çelikhane Curufu İçerisindeki Hurdaların Değerlendirilmesi*, I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak.

[38] **Kamon, M., Hartlen, J. and Katsumi, T**., (1999), "*Reuse of Waste and Its Environmental Impact*", International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Vol.1, pp.1095-1123.

[39] **Morrison, Y.,** (1974), Applications of Boiler Slag, Presented at the Regional Seminar on Ash Utilization, St. Louis, Missouri, by the American Coal Ash Association.

[40] **Noureldin, A. Sam, and McDaniel, Rebecca S.,** (1990), *Evaluation of Surfaces Mixtures of Steel Slag and Asphalt. Transportation Research Record*.

[41] **Dikbaş, A., Yonar F.,** (2013), *EAF Çelik İzabe Cürufunun Karayolu İnşaatında Dolgu, Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanımı*, İstanbul.

[42] **Erdoğan, Y., T.** (2000), *Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanılması*, İMO Yayınları, Ankara.

[43] **Karagöl, R.,** (2004), *Entegre Demir Çelik Fabrikaları Üretim Tesisleri Tanıtım Kitapçığı*, (Yayınlanmamış Rapor).

[44] **Bilen, M. (**2010), *Çelikhane Cüruflarında Liç-Karbonatlaştırma Prosesi ile Klasiyum Karbonat Kazanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.

[45] **Eren, E., Derun, E. ve Pişkin, S**. **(**2010), Çelikhane Cüruflarının Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.

[46] **Euroslag.** (2012), *Production and Use Statistics of Slag*. Erişim tarihi: 06.03.2015. Adres: www.euroslag.org/products/statistics/2012.

[47] **Juan M. Manso; Javier J. Gonzalez; and Juan A. Polanco,** (2004), *Electric Arc Furnace Slag in Concrete*, Journal Of Materıals In Cıvıl Engıneerıng © Asce / November/December 2004 / 639.

[48] **Tomellini, R., ed.** (1999), "Summary report on RTD in iron and steelslags: Development and perspectives." *Technical Steel Research*, *Report prepared for the European Commission EUR 19066 EN 1999*, ISBN *92-828-6650-5*, Brussels, Belgium, 351–352.

[49] **Gezer, B.B.** (2009), *Mersin İli Çelebili Köyü İçmeler Mevkiinde Yüzeyleyen Kireçtaşlarının Beton Ve Asfalt Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.

[50] **ASTM C127, (**2012), Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Apsorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials,* ABD.

[51] **ASTM C128, (**2012), Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Apsorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials,* ABD.

[52] **ASTM C131** (2006), Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, *American Society for Testing and Materials,* USA.

[53] **Büyükdoğaç, E., M.,** (2014), *Zeolit ve Pomzanın Asfalt Betonunda Filler ve Agrega Malzemesi Olarak Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, TC Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

[54] **ASTM D5-97, (**1997), Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, *American Society for Testing and Materials,* ABD.

[55] **Öksüz, B**. (2011), *Asfalt Betonu Kaplamalarda Volkanik Cüruf Ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

[56] **Url-1** http://www.tunerasfalt.com/bitumlu.html

[57] **Url-2** http://www.protest.com.tr/?page=deney_detay&grupid=5

[58] **Url-3** http://www.cebelgesi.biz.tr/wp-content/uploads/2013/05/images.jpg

EKLER

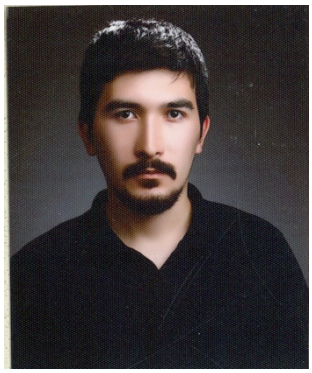
Ek 1 : Bitümlü temel tabakası için doğal agregadan elde edilen veri tablosu
Ek 2 : Bitümlü temel tabakası için EAF cürufundan elde edilen veri tablosu

Briket No	Bitüm Yüzdesi		Briket Yüksekliği	Havadaki Ağırlık	Sudaki Ağırlık	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık	Hacim	Pratik Özgül Ağırlık	Max. Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk (Vh) %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk	Akma	Stabilite	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa	gr	Ort.	gr (A)	gr (C)	gr (B)	cm^3 (V = B-C)	Dp (A/V)	Dt	Vh	VMA	Vf	Mm	kgf		kgf
1	4	48	61,2	1247,7	760,1	1260	499,9	2,50	2,64	5,45	13,97	60,99	2,30	901,2	1,08	973,7
2		48	60,4	1247,1	761,4	1256,9	495,5	2,52		4,66	13,25	64,85	2,15	927,7	1,10	1023,3
3		48	60,9	1244,9	758,3	1256,2	497,9	2,50		5,28	13,82	61,77	2,10	1060,3	1,09	1154,5
								2,50		**5,13**	**13,68**	**62,50**	**2,18**	**963,1**		**1050,5**
4	4,5	54	60,2	1248,2	759,1	1256,5	497,4	2,51	2,62	4,21	13,92	69,72	2,30	927,7	1,11	1029,4
5		54	60,4	1249,8	759,9	1259,8	499,9	2,50		4,57	14,24	67,89	2,40	1060,3	1,10	1170,5
6		54	60,1	1251	762,5	1260,2	497,7	2,51		4,06	13,78	70,55	2,30	1007,3	1,11	1119,6
								2,51		**4,28**	**13,98**	**69,37**	**2,33**	**998,4**		**1106,5**
7	5	60	59,9	1250,4	767,5	1263,8	496,3	2,52	2,60	3,11	13,99	77,73	2,35	1007,3	1,12	1124,4
8		60	60,1	1254,4	768,1	1266,4	498,3	2,52		3,19	14,06	77,27	1,75	927,7	1,11	1030,3
9		60	61,3	1258,3	769,4	1270,4	501	2,51		3,42	14,25	76,03	3,20	1060,3	1,08	1143,6
								2,52		**3,24**	**14,10**	**77,01**	**2,43**	**998,4**		**1099,5**
10	5,5	66	61,2	1265,5	768,8	1271,1	502,3	2,52	2,58	2,40	14,39	83,30	2,45	1060,3	1,08	1146,5
11		66	60,6	1255,2	764,4	1261,7	497,3	2,52		2,23	14,24	84,37	3,00	1086,8	1,10	1192,5
12		66	60,6	1257,2	764,9	1264,2	499,3	2,52		2,46	14,44	82,96	3,05	954,3	1,10	1046,2
								2,52		**2,36**	**14,36**	**83,54**	**2,83**	**1033,8**		**1128,4**
13	6	72	61,1	1254,5	763,9	1259,4	495,5	2,53	2,56	1,22	14,38	91,54	3,20	980,8	1,08	1061,5
14		72	61,2	1262	768,3	1268,8	500,5	2,52		1,62	14,73	89,01	3,50	1033,8	1,08	1117,9
15		72	62,7	1275,1	775,5	1282,1	506,6	2,52		1,79	14,88	87,94	3,10	1060,3	1,04	1102,1
								2,52		**1,54**	**14,66**	**89,47**	**3,00**	**1024,9**		**1093,8**
16	6,5	78	61,8	1262,3	766,2	1264,8	498,6	2,53	2,54	0,52	14,78	96,49	3,60	874,7	1,06	930,6
17		78	62,4	1270,3	771,8	1274,4	502,6	2,53		0,69	14,93	95,41	2,00	1166,3	1,05	1220,7
18		78	62,0	1261,4	765,1	1265,1	500	2,52		0,87	15,08	94,24	2,75	1060,3	1,06	1123,1
								2,53		**0,69**	**14,93**	**95,37**	**2,78**	**1033,8**		**1091,4**
19	7	84	62,6	1269,3	771,5	1273,8	502,3	2,53	2,53	0,01	15,34	99,93	3,70	1086,8	1,04	1133,5
20		84	63,0	1270,7	769,4	1273,7	504,3	2,52		0,30	15,58	98,09	2,70	1007,3	1,03	1039,8
21		84	63,1	1276,6	773,1	1281,1	508	2,51		0,56	15,81	96,43	3,50	874,7	1,03	899,9
								2,52		**0,29**	**15,58**	**98,14**	**3,30**	**989,6**		**1024,4**

Ek 1 : Bitümlü temel tabakası için doğal agregadan elde edilen veri tablosu

Briket No	Bitüm Yüzdesi		Briket Yüksekliği	Havadaki Ağırlık	Sudaki Ağırlık	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık	Hacim	Pratik Özgül Ağırlık	Max. Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk (Vh) %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk	Akma	Stabilite	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite
	Wa	gr	Ort.	gr (A)	gr (C)	gr (B)	cm^3 (V = B-C)	Dp (A/V)	Dt	Vh	VMA	Vf	mm	kgf		kgf
1	4	58	63,4	1505,4	1013,1	1526,4	513,3	2,93	3,17	7,60	15,88	52,13	2,20	2253,1	1,02	2302,0
2		58	63,3	1498,2	1009,4	1524,1	514,7	2,91		8,29	16,51	49,77	2,00	2332,6	1,02	2389,4
3		58	62,0	1490,3	1002,6	1513,3	510,7	2,92		8,06	16,30	50,54	2,40	2465,2	1,06	2606,8
								2,92		**7,99**	**16,23**	**50,80**	**2,20**	**2350,3**		**2432,7**
4	4,5	65,25	62,3	1509,6	1011,5	1526,8	515,3	2,93	3,14	6,77	16,37	58,65	2,40	2597,7	1,05	2728,1
5		65,25	61,4	1496,7	1000,5	1509,1	508,6	2,94		6,35	16,00	60,31	2,00	1961,5	1,08	2110,2
6		65,25	61,6	1487,2	995,8	1498,4	502,6	2,96		5,83	15,53	62,45	2,50	2597,7	1,07	2780,2
								2,94		**6,32**	**15,97**	**60,44**	**2,30**	**2385,6**		**2539,5**
7	5	72,5	63,1	1513,2	1008,8	1523,3	514,5	2,94	3,11	5,48	16,44	66,71	2,40	2756,7	1,03	2838,4
8		72,5	61,9	1515,3	1011,4	1524,5	513,1	2,95		5,09	16,10	68,41	2,30	2730,2	1,06	2897,0
9		72,5	61,8	1515,2	1011,3	1523,3	512,0	2,96		4,89	15,93	69,31	2,00	2465,2	1,06	2624,8
								2,95		**5,15**	**16,16**	**68,13**	**2,23**	**2650,7**		**2786,7**
10	5,5	79,75	60,7	1498,6	1003,4	1507,6	504,2	2,97	3,08	3,55	15,96	77,78	2,00	2359,1	1,10	2584,2
11		79,75	62,5	1525,9	1018,7	1533,6	514,9	2,96		3,83	16,21	76,37	3,20	2703,7	1,05	2827,3
12		79,75	60,9	1517	1011,1	1526,7	515,6	2,94		4,52	16,81	73,10	2,00	2571,2	1,09	2802,0
								2,96		**3,97**	**16,33**	**75,71**	**2,40**	**2544,7**		**2737,8**
13	6	87	60,7	1516,7	1011,7	1522,1	510,4	2,97	3,05	2,65	16,37	83,83	2,40	2253,1	1,09	2463,8
14		87	60,7	1524,9	1016,6	1529,4	512,8	2,97		2,58	16,32	84,19	2,50	2491,7	1,09	2724,7
15		87	63,0	1533,3	1021,4	1537,8	516,4	2,97		2,73	16,44	83,42	2,60	2677,2	1,03	2763,7
								2,97		**2,65**	**16,38**	**83,81**	**2,50**	**2474,0**		**2650,7**
16	6,5	94,25	62,7	1546,5	1030	1551,5	521,5	2,97	3,02	1,94	16,94	88,55	3,10	2465,2	1,04	2560,1
17		94,25	62,3	1529,9	1021,3	1535,6	514,3	2,97		1,63	16,68	90,21	2,30	1988,0	1,05	2086,0
18		94,25	62,1	1522,6	1018,3	1528,4	510,1	2,98		1,30	16,39	92,09	2,50	2226,6	1,05	2348,4
								2,98		**1,62**	**16,67**	**90,26**	**2,63**	**2226,6**		**2331,5**
19	7	101,5	62,6	1551,4	1035,3	1560	524,7	2,96	3,00	1,33	17,57	92,43	2,60	1882,0	1,04	1961,2
20		101,5	63,0	1545,6	1032,5	1556	523,5	2,95		1,47	17,69	91,67	2,70	2200,1	1,03	2267,2
21		101,5	62,9	1546,7	1033,5	1555	521,5	2,97		1,03	17,32	94,07	2,80	2359,1	1,03	2439,5
								2,96		**1,28**	**17,53**	**92,71**	**2,70**	**2147,1**		**2222,7**

Ek 2 : Bitümlü temel tabakası için EAF cürufundan elde edilen veri tablosu



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Cem MUTLUGELDİ

Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir 02/07/1989

E-Posta : mutlugeldicem@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2012, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği