

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK ÜSTYAPILARIN AŞINMA TABAKASINDA ELEKTRİK ARK FIRINI
CÜRUFUNUN AGREGA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Ozan KAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK ÜSTYAPILARIN AŞINMA TABAKASINDA ELEKTRİK ARK FIRINI
CÜRUFUNUN AGREGA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Ozan KAYA
(501101400)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101400 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **AHMET OZAN KAYA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“ESNEK ÜSTYAPILARIN AŞINMA TABAKASINDA ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN AGREGA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zübeyde Öztürk**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı günümüzde atık maddelerin yeniden değerlendirilmesi İnşaat Mühendisliği'nde önemli bir yere sahiptir. İTÜ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında tarafımda hazırlanan bu tez çalışmada, çelik üretimi sırasında açığa çıkan elektrik ark fırını cürufu malzemesinin bazı mühendislik özellikleri incelenerek, karayolu aşınma tabakasında agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmanın, elektrik ark fırını cürufunun karayolu tabakalarında kullanıma kazandırılması ve yeni bir alternatif kaynak olması bakımından yarar sağlamasını temenni ederim.

Çalışmalarım sırasında bana vermiş olduğu destek ve yorumlarıyla yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Her zaman çok büyük desteğini gördüğüm, bu tezin yapımında çok büyük katkıları olan değerli hocam Sayın Öğr. Gör. Dr. A. Faik İYİNAM'a teşekkür ederim. Çalışmalarımın başından beri hiç bir yardımı esirgemeyen, yoğun temposuna rağmen çok emeği geçen Sayın İnşaat Yüksek Mühendisi Fatih YONAR'a minnettarlığımı sunarım. Tezin hazırlanmasında çok büyük katkıları olan değerli arkadaşlarım Emre DEMİRCİ'ye, Belde DEMİRCİ'ye, Özgür HASANÇEBİOĞLU'na, Zehra KOÇ'a ve Onur GÜNEŞ'e çok teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan, üzerimde büyük emeği geçen aileme sabır ve anlayışlarından dolayı sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Aralık 2013

Ahmet Ozan KAYA
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
2. KARAYOLU ÜSTYAPI TABAKALARI.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Rijit Üstyapı	6
2.2.1 Taban zemini.....	7
2.2.2 Temel tabakası	8
2.2.3 Beton plak	8
2.3 Yarı Rijit (Komposit) Üstyapı.....	9
2.4 Esnek Üstyapı.....	10
2.4.1 Taban zemini.....	10
2.4.2 Alttemel tabakası.....	11
2.4.3 Temel tabakası	11
2.4.4 Bitümlü temel tabakası.....	12
2.4.5 Kaplama tabakası	12
3. ESNEK ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANILAN MALZEMELER	
VE ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1 Bitümlü Bağlayıcılar	15
3.2 Agregalar	16
3.2.1 Alttemel tabakası.....	18
3.2.2 Temel tabakası	20
3.2.3 Bitümlü temel tabakası.....	24
3.2.4 Kaplama tabakası	26
4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ VE CÜRUF OLUŞUMU	31
4.1 Demir Çelik Sektörü.....	31
4.2 Demir Çelik Üretimi.....	34
4.2.1 Bazik oksijen fırını (BOF)	36
4.2.2 Elektrik ark fırını (EAF)	39
4.3 Cüruf Oluşumu	42
4.3.1 Yüksek fırın cürufu	42
4.3.2 Çelikhane cürufu	43
4.3.2.1 BOF cürufu	44
4.3.2.2 EAF cürufu.....	45

5. CÜRUFLARININ ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI	47
5.1 Cürufkların Fiziksel Özellikleri	48
5.2 Cürufkların Kimyasal Özellikleri	51
5.3 Cürufkların Kullanım Alanları	52
6. MALZEME VE YÖNTEM	61
6.1 Kullanılan Malzemeler	61
6.1.1 EAF cürufu	61
6.1.2 Doğal agrega	62
6.1.3 Bitüm	62
6.2 Kullanılan Yöntemler	63
6.2.1 Agregalara uygulanan deneyler	63
6.2.1.1 Elek analizi	63
6.2.1.2 Özgöl ağırlık deneyleri ve su emme oranları	65
İri agregalar için özgöl ağırlık deneyi ve su emme oranı	65
İnce agregalar için özgöl ağırlık deneyi ve su emme oranı	66
Mineral filler için özgöl ağırlık deneyi	67
6.2.1.3 Los Angeles aşınma deneyi	67
6.2.1.4 Yassılık indeksi deneyi	69
6.2.1.5 Soyulma deneyi	69
6.2.1.6 Cilalanma deneyi	70
6.2.1.7 Organik madde içeriği deneyi	71
6.2.2 Bitüme uygulanan deneyler	72
6.2.2.1 Penetrasyon deneyi	72
6.2.2.2 Özgöl ağırlık deneyi	72
6.3 Marshall Yöntemi ile Bitümlü Karışımların Tasarımı	73
6.3.1 Deney numunelerinin hazırlanması	74
6.3.2 Marshall stabilite ve akma deneyi	76
6.3.3 Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi	79
6.4 Kaplama Karışım Hesapları için Gerekli Bağıntılar	80
6.4.1 Agregada hacim özgöl ağırlığı ve zahiri özgöl ağırlığı	80
6.4.2 Agregada efektif özgöl ağırlığının tayini	80
6.4.3 Farklı bitüm miktarlarında karışımın maksimum özgöl ağırlığı	81
6.4.4 Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki agregalar arası boşluk (VMA) yüzdesi hesabı	81
6.4.5 Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu (V_h) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin (V_f) hesaplanması	82
7. DENEYSEL BULGULAR	85
7.1 Agregada Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	85
7.1.1 Granülometri	85
7.1.2 Özgöl ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	86
7.1.2.1 İri ve ince agregada özgöl ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	86
7.1.2.2 Mineral fillerin zahiri özgöl ağırlığının belirlenmesi	87
7.1.3 Los Angeles aşınma deneyi sonuçları	87
7.1.4 Yassılık indeksi deneyi sonuçları	88
7.1.5 Soyulma deneyi sonuçları	88
7.1.6 Cilalanma deneyi sonuçları	88
7.1.7 Organik madde içeriği deneyi sonuçları	89
7.2 Bitüm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	89
7.3 Marshall Deneyi Sonuçları	90
7.3.1 EAF cürufu için grafikler	90

7.3.2 EAF cürufu için optimum bitüm yüzdesi sonuçları	94
7.3.3 Doğal agrega için grafikler	95
7.3.4 Doğal agrega için optimum bitüm yüzdesi sonuçları.....	99
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR	107
EKLER.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	115

KISALTMALAR

EAF	: Elektrik Ark Fırını
GT	: Granüler Temel
PMT	: Plent-Miks Temel
ÇBGT	: Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel
CBR	: Kaliforniya Taşıma Gücü
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
EAFT	: Elektrik Ark Fırını Tozları
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
VFB	: Bitümle Dolu Boşluk
VMA	: Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Agregalar Arası Boşluk

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri	17
Çizelge 3.2 : Alttemel malzemesi granülometri limitleri	19
Çizelge 3.3 : Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 3.4 : Alttemel sıkıştırma kriterleri	20
Çizelge 3.5 : Temel tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri.....	21
Çizelge 3.6 : Temel tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri	21
Çizelge 3.7 : Granüler temel tabakası granülometri limitleri	22
Çizelge 3.8 : Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri	22
Çizelge 3.9 : Plent-miks temel tabakası granülometri limitleri	23
Çizelge 3.10 : Plent-miks temel tabakası sıkıştırma kriterleri	23
Çizelge 3.11 : ÇBGT tabakası granülometri limitleri.....	24
Çizelge 3.12 : Bitümlü temel tabakası granülometri limitleri	24
Çizelge 3.13 : Bitümlü temel tabakasında kullanılan ince agreganın özellikleri	25
Çizelge 3.14 : Bitümlü temel tabakasında kullanılan kaba agreganın özellikleri.....	25
Çizelge 3.15 : Bitümlü temel tasarım kriterleri	26
Çizelge 3.16 : Binder tabakası için granülometri limitleri	27
Çizelge 3.17 : Aşınma tabakası için granülometri limitleri.....	27
Çizelge 3.18 : Kaplama tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri	28
Çizelge 3.19 : Kaplama tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri	28
Çizelge 3.20 : Kaplama tabakası tasarım kriterleri.....	29
Çizelge 4.1 : Yıllık ham çelik üretim miktarları.....	32
Çizelge 4.2 : Başlıca ham çelik üreticisi ülkeler ve üretim miktarları.....	32
Çizelge 4.3 : Türkiye' deki BOF tesisleri ve üretim miktarları	33
Çizelge 4.4 : Türkiye' deki EAF tesisleri ve üretim miktarları.....	33
Çizelge 4.5 : EAF girdi ve çıktıları.....	40
Çizelge 5.1 : Cürufların fiziksel özellikleri	48
Çizelge 5.2 : Erdemir cüruflarının fiziksel özellikleri	49
Çizelge 5.3 : Cürufların mekanik özellikleri	50
Çizelge 5.4 : Erdemir cürufunun mekanik özellikleri	50
Çizelge 5.5 : Havada soğutulmuş YFC ve çelik cürufunun tipik fiziksel özellikleri	51
Çizelge 5.6 : Cürufların kimyasal bileşimleri.....	52
Çizelge 5.7 : Demir ve çelik cüruflarının kullanım alanı özet tablosu	56
Çizelge 6.1 : EAF cürufu özellikleri ve şartname değerleri	61
Çizelge 6.2 : Doğal agrega özellikleri ve şartname değerleri.....	62
Çizelge 6.3 : Bitüm sınıfları ve kullanılacak yerler	63
Çizelge 6.4 : Amerikan elek sistemi.....	64
Çizelge 6.5 : Marshall stabilite değerleri için düzeltme faktörleri	78
Çizelge 7.1 : Çalışmada kullanılan granülometri limitleri.....	85
Çizelge 7.2 : Kaba ve ince agreganın özgül ağırlık sonuçları	86
Çizelge 7.3 : Kaba ve ince agreganın su emme oranı sonuçları	87
Çizelge 7.4 : Mineral fillerin özgül ağırlık değerleri.....	87

Çizelge 7.5 : Los Angeles aşınma değerleri	88
Çizelge 7.6 : Bitüme uygulanan bazı deneyler ve değerleri	89
Çizelge 7.7 : Aşınma tabakası asfalt betonu bitümlü karışım gerekleri	94
Çizelge 7.8 : Optimum bitüme göre bulunan değerler ve limitler	95
Çizelge 7.9 : Optimum bitüme göre bulunan değerler ve limitler	99
Çizelge 8.1 : Doğal agrega için Marshall deneyi sonuçları	102
Çizelge 8.2 : EAF cürufu için Marshall deneyi sonuçları.....	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Beton yol kesiti ve yapı elemanları	7
Şekil 2.2 : Esnek, kompozit ve rijit (beton yol) üstyapı tabaka konfigürasyonları	9
Şekil 2.3 : Esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları	13
Şekil 4.1 : Türkiye'de kurulu demir-çelik üreticileri ve üretim kapasiteleri.....	34
Şekil 4.2 : Yüksek fırın.....	35
Şekil 4.3 : Bazık oksijen fırını	37
Şekil 4.4 : BOF yönteminin aşamaları.....	38
Şekil 4.5 : Yüksek fırından gelen pik demirin BOF'na dökülmesi	39
Şekil 4.6 : Üç elektrotlu elektrik ark fırını.....	40
Şekil 4.7 : Elektrik ark fırınlı fabrika.....	41
Şekil 4.8 : Avrupa'da yüksek fırın cürufu üretimi.....	43
Şekil 4.9 : Avrupa'da çelik cürufu üretimi	44
Şekil 5.1 : EAF cürufunun görüntüsü	49
Şekil 5.2 : Avrupa'da yüksek fırın cürufu kullanımı	55
Şekil 5.3 : Avrupa'da çelikhane cürufu kullanımı	57
Şekil 6.1 : Los Angeles aşınma deneyinde kullanılan cihaz.....	68
Şekil 6.2 : Penetrasyon deney aleti	72
Şekil 6.3 : Etüv	74
Şekil 6.4 : Mekanik asfalt karıştırıcısı	75
Şekil 6.5 : Deney numunelerini sıkıştırmada kullanılan otomatik tokmak	76
Şekil 6.6 : Marshall deney numuneleri	76
Şekil 6.7 : Su banyosu	77
Şekil 6.8 : Marshall deney aleti	78
Şekil 6.9 : Numune hacim-ağırlık görünümü	83
Şekil 7.1 : Boşluk (V_h) - bitüm % grafiği	90
Şekil 7.2 : VMA - bitüm % grafiği	91
Şekil 7.3 : VFB (V_f) - bitüm % grafiği	91
Şekil 7.4 : Pratik özgül ağırlık - bitüm % grafiği	92
Şekil 7.5 : Stabilite - bitüm % grafiği	93
Şekil 7.6 : Akma - bitüm % grafiği	93
Şekil 7.7 : Boşluk (V_h) - bitüm % grafiği	96
Şekil 7.8 : VMA - bitüm % grafiği	96
Şekil 7.9 : VFB (V_f) - bitüm % grafiği	97
Şekil 7.10 : Pratik özgül ağırlık - bitüm % grafiği	97
Şekil 7.11 : Stabilite - bitüm % grafiği	98
Şekil 7.12 : Akma - bitüm % grafiği	98

ESNEK ÜSTYAPILARIN AŞINMA TABAKASINDA ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN AGREGA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Nüfus artışına ve hızlı sanayileşmeye bağlı olarak dünyadaki doğal kaynaklar her geçen gün azalmaktadır. Bu kaynakların hızla tüketilmesi, doğal çevrenin tehlikeli bir biçimde bozulmasına neden olmaktadır. Bu tahribatın etkilerini azaltmak ve ortadan kaldırmak amacıyla, bazı malzemelerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Atık malzemeleri yeniden değerlendirerek kullanmak hem çevrede oluşacak problemleri en aza indirmekte, hem de ülke ekonomisi için birçok fayda sağlamaktadır. Son yıllarda, endüstriyel atıkların karayolu tabakalarında değerlendirilmesi için yapılan çalışmalar yaygınlaşmıştır.

Çalışmada, elektrik ark fırını (EAF) kullanarak hurda çelikten üretim yapan işletmelerde atıl madde olarak açığa çıkan EAF cüruflarının esnek üstyapıların aşınma tabakasında agrega olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Doğal agrega ile kıyaslama yapılarak uygunluğu araştırılmıştır. Ülkemizde 2012 yılında yaklaşık 3,6 milyon ton EAF cürufu ortaya çıkmıştır. Atıl olarak bekleyen bu ürünler agrega olarak değerlendirilerek hem ekonomiye kazandırılmış olacak hem de alternatif ve ekonomik bir agrega kaynağı elde edilecektir.

Çalışmanın ilk bölümünde, yapılan araştırmanın önemi, amacı ve kapsamı açıklanmıştır. Diğer bölümlerde, üstyapı tabakaları hakkında genel bilgi verilmiştir. Esnek üstyapı tabakalarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri belirtilmiştir ve bu tabakaların şartname limitleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde, demir çelik sektörü hakkında bilgiler verilmiştir. Türkiye'nin demir çelik üretiminde dünyada bulunduğu konum sayısal bilgilerle açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca, cüruf oluşumu ve çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Cürufların özellikleri ve kullanım alanları hakkındaki bilgiler ise beşinci bölümde verilmiştir. Altıncı ve yedinci bölümlerde ise, EAF cürufunun esnek üstyapı aşınma tabakasında agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve geleneksel olarak kullanılan doğal agrega ile karşılaştırması yapılmıştır. EAF cürufunun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılarak şartname limitleriyle kıyaslanmıştır. Los Angeles aşınma deneyi, cilalanma deneyi, soyulma deneyi, yassılık indeksi deneyi, su emme tayini gibi deneyler uygulanmıştır. Ayrıca, %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0, %6,5 ve %7,0 bitüm oranları kullanılarak oluşturulan asfalt betonu karışımların optimum bitüm yüzdesi Marshall stabilite deneyleri ile belirlenmiştir. Elde edilen fiziksel ve mekanik sonuçlar geleneksel olarak kullanılan doğal agrega malzemesi ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümünde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilere göre değerlendirmeler yapılmıştır. EAF cürufunun esnek üstyapı aşınma tabakasında kullanılabilirliği ile ilgili elde edilen sonuçlar verilmiştir.

INVESTIGATION OF USAGE OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AS AGGREGATE IN WEARING COURSE OF FLEXIBLE PAVEMENTS

SUMMARY

Natural resources of the world have been steadily decreasing day by day depending on population growth and rapid industrialization. Rapidly consumption of these resources leads to environmental deterioration dangerously. In order to prevent hazardous effects of this destruction, various studies is conducted to re-evaluate waste and byproduct generated while producing some materials. Recycling the waste materials both prevents and reduces the hazardous effects to environment and has got many benefits to the economy of the country.

The main reason laying under environmental problems all around the world is nonequilibrium between economy and environment. While people are increasing their quality of life economically by development of scienc, technology and industry, also they are polluting the world unconsciously. Nowadays, we are facing a terrible difficulties due to uncoordinated industrialization, unplanned urbanization, local wars, unwise usage of chemicals in agricultural activities and the pollution of heavy industrial facilities which have not taken precautions while producing. These waste materials can be counted as garbage, plastics, glasses, medical wastes occured after production processes and also expired ones. Waste management is known as collection, transportation, processing and abolition of the waste materials. Natural resources have been consumed in process due to the increasement of human population and changing of the consumption habits. Hence, natural resources should be used wisely by reducing the consumption of materials. Thence, recycling is the key process of saving the natural resources and producing them efficiently.

Most consumption of the raw materials have been come in the construction industry. Minimalizing the inputs during production process, reducing the usage of raw materials, energy consumption, emissions, time and environment are the main purposes of construction sector. Concrete, asphalt, wooden materials, aluminium, iron-steel materials can be counted as the mostly consumed materials in this sector. These materials have got a large percentage in recycling processes. For instance, in the USA, 80 % of asphalt mixture are recyled. Hence, it is clearly understood that contrary to aluminiums, glasses and plastics; asphalt is remarkably recyclable material. Especially in the construction sector, recycling process provides resources of raw materials on the view of consumption which would result with economical benefits appearently. On this occasion in recent years, studies on the evaluation of industrial wastes in highway layers have become more popular.

It is essential that to indicate the importance of the amount of aggregate used in the construction sector. For instance, the needing of aggregate for a school construction is 2800 tones, for a hotel construction is 1100 tones and for 1 km highway construction is 30000 tones. This consumption of the amount of aggregate is supplied by natural aggregate sources or aggregate pits around, therefore the

demand to the aggregate pits is rising and it causes the damage of the earth's natural form.

The slag which is outcome as a waste in the process of iron and steel production has been a research subject in many countries from the point of its high content of steel. Parallel to the technologic developments, to prevent the environmental pollution caused by waste and to supply the recovery of them have improved. For reusing the waste because of the importance environmentally there are still many studies, additionally, in our country it is controlled with laws (Solid Waste Management). Therefore, defining of steel slags, determining of its features and deciding of evaluating methods have became essential. To provide waste sources management by reducing waste production is the aim of effective way of waste management. The method should be found in a system of regarding environmental and economic parameters. To the aim of supplying the best technique of waste reuse increasing recycle ratio, improving nonrecyclable sources, genereating new productions, research and development activities are in progress today.

In this study, the usage of EAF slag which is generated as waste material producted from scrap steels in facilities were researched as aggregate in wearing course of flexible pavement. It was investigated suitability comparing with traditionally used natural aggregate. In 2012, approxiamtely 3,6 million tonnes EAF slag have been released in Turkey. Evaluation of these idle materials as aggregate provides both benefits to economy and also as alternative and cheaper aggregate resources.

In the first chapter of the thesis, the importance, purpose and scope of the study were explained. In the second chapter, a general information related to flexible pavement was given. In the third chapter, materials, and their properties used in layers of flexible pavement were stated. Also, some extra information has been given about condition limits of flexible pavement layers in this section.

In the fourth chapter, some information about the iron-steel sector has been given. About the position of Turkey's iron-steel production in the world is explained with quantitative information. Also, information about slag formation and varieties of slag have been given in this chapter. Information about properties and usage areas of slag have been given in fifth chapter.

In the sixth and seventh chapter, the usage of EAF slag in wearing course of flexible pavements was investigated and compared with traditionally used natural aggregate. EAF slag taken from Colakoglu Metallurgy Inc. which is located in Kocaeli, Turkey are used in the scope of this study. In order to determine the physical properties of EAF slag, experiences have been done and they have been compared by using condition limits. All the experimantal studies are conducted as per Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification. Additionally, the optimum percentage of bitumen of asphalt mixture was determined by Marshall Stability tests using bitumen content of %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0, %6,5 and %7,0. The physical and mechanical results were compared with natural aggregate which is used traditionally.

In the conclusion chapter, suggestions have been given according to evaluation of the results of experimental studies.

EAF slag are stocked as waste material. Yet, it does not take part in any product classification. Hence, aggregates in this study are prepared according to average of

Type-1 granulometry which is given for the wearing course in Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification.

EAF slag suggested to be used as wearing course by taking other precautions due to its resistance is high against polishing. Flexible pavements which are prepared with EAF slag, determined as optimum percentage of bitumen, are checked according to ASTM standards and decided as safe and suitable.

Some variance such as moisture, temperature etc. may affect bitumen percentage. Therefore, climatic conditions, geology and topography of area should be analyzed well during experimental studies.

In 2012, 35,9 million tonnes steel are produced in Turkey. Approximately 120-150 kg slag have been released during producing 1 ton steel. Thus, In 2012, 4,8 million tonnes slag have been released and 3,6 million tonnes of them are EAF slag. EAF slag waiting waste material should be used as aggregate. In this way, alternative and economical aggregate resource is acquired.

1. GİRİŞ

Doğal kaynaklarımız dünya nüfusunun artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi nedeniyle her geçen gün azalmaktadır. Dikkatlice kullanılmadığı takdirde bir gün bu kaynakların tükeneceği şüphesizdir. Tüm canlılar gibi insanın da yaşaması, gelişmesi ve mutluluğu, yaşadığı ortamın gelişmesine ve dengesine bağlıdır. İnsanlar olayları genellikle salt günlük faydaları açısından değerlendirerek, gelecekle ilgili fazla düşünmemektedir. Ancak, son yıllarda çevre sorunlarının tüm canlıların sağlık ve yaşamını tehlikeye sokacak boyutlara ulaşması bu bakış açısında bazı değişmelere yol açmıştır. Nitekim, çevre sorunlarının boyutlarındaki genişleme, bazı doğal kaynakları tükenme sınırına ulaştırırken, içilen sudan solunan havaya kadar sağlıklı bir ortam yaratmıştır. Doğal çevrenin tehlikeli bir biçimde bozulmaya başlaması, insanları bu tehlikelerin nedenlerini anlamaya ve araştırmaya yöneltmiştir [1].

1.1 Çalışmanın Amacı

Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı dünyamızda son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardan birisi de geri dönüşümdür. Atıkların hammadde gibi kullanılarak yeni bir maddeye dönüştürülmesine geri dönüşüm denir. Ekonomik zorluklarla karşı karşıya bulunan ve kalkınmakta olan ülkelerde de doğal kaynaklardan uzun vadede ve maksimum bir şekilde faydalanabilmek için atık israfına son verilmesi, ekonomik değeri olan maddeleri geri kazanma ve tekrar kullanma yöntemlerinin araştırılmaları gerekmektedir. Atık malzemelerin alternatif kullanım alanlarının bulunması son yıllarda ülkemizde giderek önem kazanmaya başlamıştır. Endüstriyel atıkların inşaat sektörünün değişik dallarında kullanılması ile büyük hacimlerde kullanıma olanak sağlanabilecek, sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketimi önlenebilecek, ekonomik kazanç sağlanabilecek ve atıkların sebep olduğu çevre problemlerine bir ölçüde çözüm getirebilecektir.

Dünyanın pek çok ülkesinde ortaya çıkan çevre sorunlarının temelinde, ekonomi ve çevre arasındaki dengesizlik yatmaktadır. İnsanoğlu, bir yandan hızla gelişen bilim,

teknoloji ve sanayi ile ekonomik açıdan yaşam kalitesini yükseltirken diğer yandan da doğaya zarar vermektedir. Plansız endüstrileşme, sağlıksız kentleşme, bölgesel savaşlar, tarımda kimyasal maddelerin bilinçsiz kullanımı ve gerekli önlemler alınmadan yoğun üretime geçen sanayi tesislerinin yarattığı kirlilik sonucu bugün çok olumsuz tablolar ile karşılaşmaktadır. Atık malzemeler; çöpler, plastikler, camlar, tıbbi atıklar, bir üretim işlemi sonucu ortaya çıkan malzemeler veya kullanım ömrünü tamamlamış malzemeler olabilir. Atık maddelerin toplanma, taşınma, işlemiden geçirilme ve ortadan kaldırılması atık yönetimi olarak bilinmektedir. Geri dönüşüm ile doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanır. Doğal kaynaklarımız dünya nüfusunun artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi nedeniyle her geçen gün azalmaktadır. Bu nedenle, malzeme tüketimini azaltmak, değerlendirilebilir nitelikli atıkları geri dönüştürmek suretiyle doğal kaynakları verimli kullanmak gerekmektedir. Dolayısıyla, geri dönüşüm doğal kaynakların korunması ve verimli kullanılması için son derece önemli bir işlemdir.

Hammaddenin en çok tüketildiği sektörlerden birisi inşaat sektörüdür. İnşaat sektörü, imalat süreçlerindeki girdileri asgari düzeye indirmeye, hammaddelerin kullanılmasını, enerji tüketimini, emisyonları ve mekan kullanımını mümkün olduğu kadar azaltmaya çalışmaktadır. Bu sektörde tüketilen malzemelerin başında beton, asfalt, ahşap, alüminyum, demir gibi malzemeler gelmektedir. Bu tür malzemeler geri dönüşümde çok yaygın olarak kullanılan diğer önemli malzemelerdir. Amerika'da asfalt malzemedeki geri dönüşüm oranı % 80'dir. Bu değerden, asfalt malzemedeki geri dönüşümün alüminyum, cam, plastik gibi geri dönüştürülebilen malzemelerden daha fazla geri dönüştürüldüğü anlaşılmaktadır. Talep ve tüketim açısından bakıldığında, geri dönüşümün özellikle inşaat alanında yaygın bir şekilde uygulanmasının önemli miktarlarda ekonomik ve hammadde kaynağı sağlayacağı görülebilir [2].

Çeşitli inşaatların yapımında kullanılan agrega miktarları, agreganın, sektördeki önemini göstermesi bakımından ilginç olacaktır; Bir okul 2800 ton, bir hotel 1100 ton, 1 km otoyol 30.000 ton, 1 km çift demiryolu hattı 16.000 ton, nükleer güç santrali 6 ila 12.10⁶ ton [3]. Tüketilen bu agrega miktarları civardaki agrega ocaklarından veya doğal agrega kaynaklarından temin edilmektedir. Dolayısıyla, her geçen gün yeni kırmataş ocaklarına olan talep giderek artmakta ve bu ocaklar

sebebiyle yeryüzünün genel yapısı bozulmakta, çevrede hoş olmayan görüntüler oluşmaktadır.

Demir çelik üretim işlemi sırasında ortaya çıkan bir atık olan cürufun çelik içermesi nedeniyle değerlendirilebilir olması ve çelik üretimi esnasında fazla miktarda açığa çıkması nedeniyle, bu malzeme bir çok ülkede araştırma konusu olmuştur. Teknolojik gelişmelere paralel olarak, atıkların sebep olduğu çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda atıkların geri kazanımı (demir çelik cüruflarının çeşitli alanlarda değerlendirilmesine yönelik olan çalışmalar) hız kazanmıştır. Atıkların yeniden kullanılması için yoğun çalışmalar yapılmakta ve çevre açısından da önemli olması nedeniyle dünyada ve ülkemizde yasalarla da (Katı Atık Kontrol Yönetmeliği) desteklenmektedir. Bu nedenle, çelikhane cürufunun tanımlanması, özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilebilme yöntemlerinin saptanması önemli bir konu haline gelmiştir. Atık oluşumunu azaltarak atık kaynaklarının dikkatli bir şekilde yönetimini sağlamak, etkin bir atık yönetiminin amacıdır. Atıkların en uygun kullanımını sağlamak, geri dönüşüm oranını artırmak, geri dönüşümü olmayan kaynakları geliştirmek ve yeni ürünler üretebilmek amacıyla birçok araştırma ve geliştirme yapılmaktadır [4].

Bu çalışmada, elektrik ark fırını (EAF) kullanarak hurda demirden üretim yapan işletmelerde atık madde olarak açığa çıkan EAF cüruflarının asfalt betonu aşınma tabakasında Tip-1 granülometrisine göre agrega olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceği incelenmiştir. Ayrıca, halihazırda kullanılan malzemelerle karşılaştırılarak fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Kocaelide bulunan Çolakoğlu Metalurji A.Ş. tesislerinden alınan EAF cürufları kullanılarak araştırma yapılmıştır.

2. KARAYOLU ÜSTYAPI TABAKALARI

2.1 Giriş

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

Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölge altyapı olarak adlandırılır. 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 [5].

Üstyapı, trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı yol yapısıdır. Üstyapılar, üzerinde seyreden trafiğin güvenliği, konforu, hacmi ve kompozisyonu gibi faktörlerin yanı sıra ekonomiklik, iklim, bölge koşullarına uygunluk gibi faktörlerin de dikkate alınması suretiyle projelendirilir ve inşa edilir.

Kaplamalar, trafik ve çevre etkilerine karşı koyan ve trafik yüklerini zemine ileten yapılardır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri her bir tabakanın yük dağıtma özelliğine bağlıdır. Bu nedenle, kaplama kalınlığı, zeminin taşıma gücüne ve kaplamanın tipine bağlı olarak değişir [6].

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit, yarı rijit ve esnek üstyapı olarak üç ana gruba ayrılmaktadır.

2.2 Rijit Üstyapı

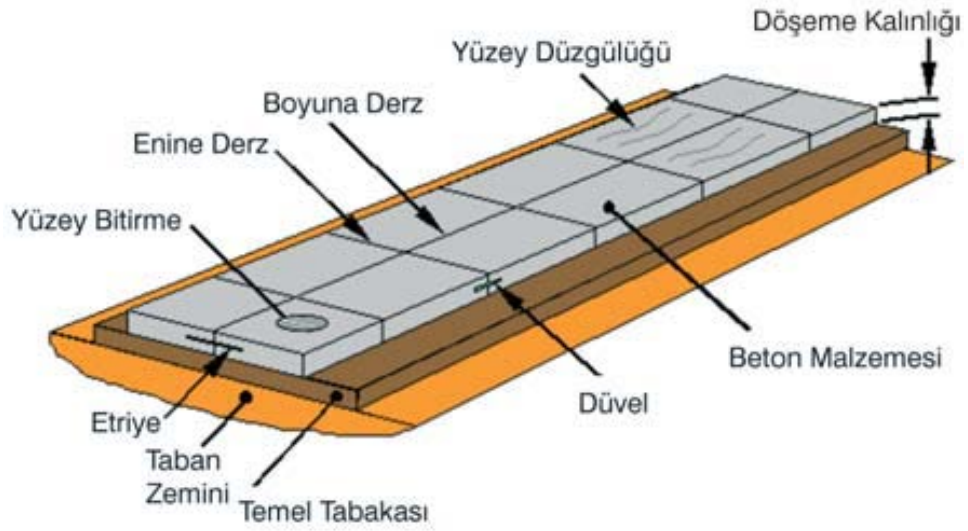
Rijit üstyapılar, çok yüksek trafik hacmine ve ağır trafiğe sahip karayollarında ve havaalanlarında taşıtlar için gerekli sürüş konforu ve sürüş emniyetini temin etmek amacıyla yapılan yüksek standartlı üstyapılardır [6].

Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Beton, çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağlantı 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 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 değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ile basınç arasında değişen sürekli gerilmeler oluşur, bu durum zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. O halde bu tip gerilmelerin, betonun sürekli direncinin çok altında bulunması gerekir. Diğer malzemeler gibi beton da sıcaklığın artmasına veya azalmasına bağlı olarak genişlemekte veya büzülmetedir. Buna ek olarak kaplamaların alt ve üst yüzeyleri günlük ve mevsimlik sıcaklık ve nem farkları nedeniyle eğilme ve bükülmelere uğrar.

Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabakalarının özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen alttemel ve temel tabakaları ile mevcut taban toprağının özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle, projelendirme sırasında, beton kaplamanın davranışını etkileyen, taban toprağı, temel malzemesi, betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin fiziksel özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir.

Rijit üstyapılar, taban zemini üzerine yapılan beton plakalardan oluşur. Sürekli donatının kullanılmadığı beton yollarda enine ve boyuna genişleme derzleri konulur (Şekil 2.1). Don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı ise beton kaplama ile taban zemini arasında kaplama altı (temel) tabakası yapılır. Beton plağın elastisite modülü taban zemininkinden çok büyüktür. Bu nedenle, beton yol, elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışır. Trafik yüklerini esnek üstyapıya nazaran daha geniş alana

yayarak, taban zeminine iletir. Rijit beton plak, taban zemini ile sürekli temas halinde olduğu sürece taşıyıcı eleman vazifesi görür. Taban zemini çeşitli nedenlerle çökerse, taban zemininin deformasyonuna uyamayan rijit beton plak, bu kısımlarda kırış gibi çalışmaya başlar, betonun düşük olan çekme basıncının aşılması sonucunda kaplama kırılır. Tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipi olup, gerektiğinde granüler bir kaplama altı tabakası da kullanılabilir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Beton, çekme direnci düşük, deformasyonlar ile gerilmeler arasında bağlantıları doğrusal olmayan bir malzemedir [7].



Şekil 2.1 : Beton yol kesiti ve yapı elemanları.

2.2.1 Taban zemini

Rijit bir üstyapının davranışı taban zeminin fiziksel özellikleri ve taşıma gücü ile doğrudan doğruya ilgilidir. Bazı taban zeminleri rijit kaplamaların davranışlarına zarar verecek özelliktedirler. Bu zararlı etkileri çoğu zaman plak kalınlığını artırarak gidermek mümkün değildir.

Serbest su bulunması halinde alttemel kısmına uygun malzeme koyarak pompaj olayına yatkın zemin korunmalıdır. Plastisite indeksi 25'ten az olan zeminler uygun bir deney yöntemiyle tespit edilen yoğunlukların en az %95'i elde edilecek şekilde sıkıştırılmalıdır.

Yüksek plastisite indeksine sahip killi zeminler alttemel tabakasına ilave olarak yeterli kalınlıkta seçme malzeme ile örtülmelidir.

Don olan alanlarda, önlem olarak dona hassas zemin sıyrılıp atılmalıdır. İyi sıkışmamış taneli taban zeminleri trafiğin titreşimiyle yerleşerek oturacağı için yeterince sıkıştırılmalıdır.

Fazla elastik olan zeminlerde yeterli kalınlıkta uygun malzeme ile ek çökmelerin oluşturacağı zararlı etkilerin önüne geçilir [7].

2.2.2 Temel tabakası

Beton kaplamaya zarar verecek aşağıdaki hallerden biri veya birkaçının mevcut bulunduğu hallerde, beton plak ile taban zemini arasına taneli malzemeden oluşmuş bir tabaka serilir. Bu tabakaya temel veya kaplama altı tabakası denir.

Temel tabakasını gerektiren haller:

- Donma etkisi
- Yüksek hacim değişmesi gösteren topraklarda "şişme" ve "büzülme" etkisi
- İnce taneli topraklarda "pompaj" etkisi

Donma etkisi yer yer şiddetli dalgalanma hareketlerine sebep olur. Bu durum, kaplama yüzeyinin yararlığını yok eder veya tabanda devamlı genişleme ve yumuşama haline sebep olur. Sonunda, tabanın taşıma gücü öyle bir değere düşer ki kaplama artık normal yükleri dahi taşıyamaz duruma gelir. Silt ve çok ince taneli kumlar gibi kapilaritesi yüksek olan zeminler donma etkisinden en çok etkilenen zeminlerdendir.

Yüksek hacim değişimi gösteren topraklara şişme ve büzülme önlemek için şişme yapmayan granüler malzemeden temel tabakası yapılır. Bu tabakanın kalınlığı toprağın şişme özelliğine, nemlilik durumuna, o yerin iklimine ve kaplama altı tabakasında kullanılan malzemenin sızdırmazlık yeteneğine bağlıdır. Ancak, minimum alttemel kalınlığı 30 cm alınmalıdır.

Pompaj (boşalma) olayına karşı yapılan kaplama altı tabakasında (kum + az kil + çakıl) dan oluşmuş granüler malzeme kullanılır. Kaplama altı tabakası en çok 15 cm'lik tabakalar halinde serilir [7].

2.2.3 Beton plak

Beton yolların yüzeyleri kayma sakıncası göstermediği ve tutucu, pürüzlü olduğu için, bu yüzeylerde %7'ye kadar boyuna eğim uygulanabilir. Daha fazla eğimli ya da

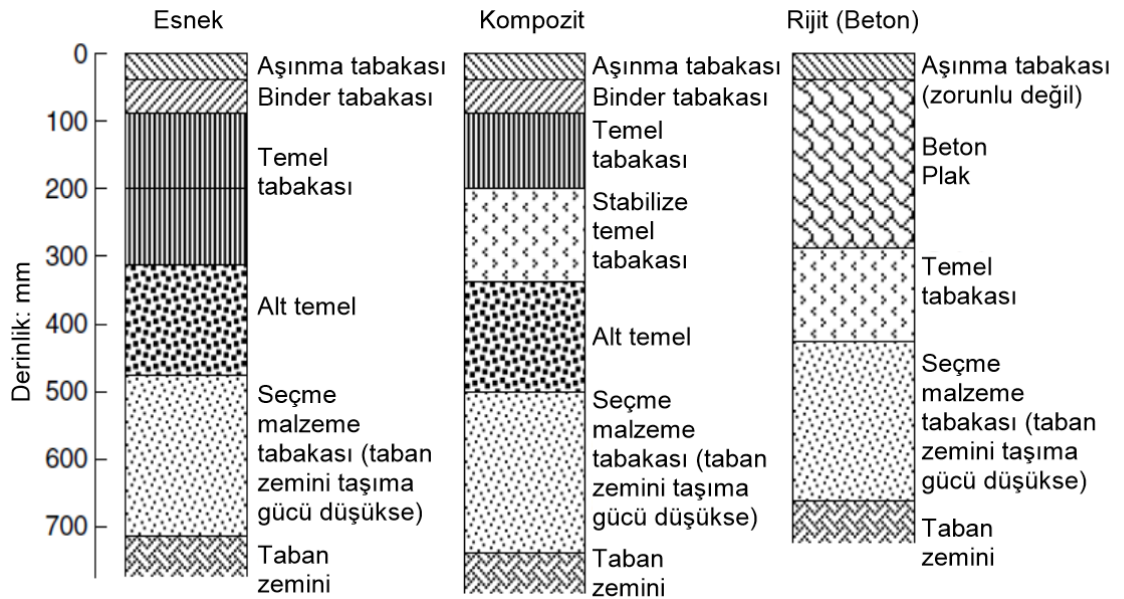
daha pürüzlü bir beton yol isteniyorsa yüzeyin özel olarak pürüzlendirilmesi gerekir. Değişik pürüzlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Teknik Şartnamelerde yağış sularının çabuk akması için minimum boyuna eğim %0,4 olarak belirtilmiştir.

Beton yolun yüzeyinin düzgün olması suların kolayca akmasına müsait olduğu için, enine eğim boyuna eğime bağlı olarak diğer kaplama cinslerine göre daha küçük alınabilir. Düşük boyuna eğimlerde enine eğim % 2,0; dik boyuna eğimlerde de minimum % 1 olmalıdır.

Taban zemini özellikleri nedeniyle plak kalınlığını arttırmak gerekirse, bu kalınlık en çok 25 cm'ye kadar çıkarılabilir. En düşük kalınlığa gelince, mevcut ve sağlam bir altyapı üzerine gelecek beton döşemelerin kalınlığı birinci sınıf yollarda 15 cm, ötekilerde 12 cm'den az olamaz. Bu kalınlıklar betonun tek tabaka olarak dökülmesi hali için verilmiştir [7].

2.3 Yarı Rijit (Kompozit) Üstyapı

Yarı rijit üstyapılar, zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak bitümlü karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilir [6]. Ancak, kompozit üstyapıların maliyeti çok yüksek olduğu için, bu kaplamalar nadiren tercih edilir. Esnek, kompozit ve rijit üstyapı örnekleri detaylı bir biçimde Şekil 2.2'de görülmektedir. [8].



Şekil 2.2 : Esnek, kompozit ve rijit (beton yol) üstyapı tabaka konfigürasyonları.

2.4 Esnek Üstyapı

Esnek üstyapılar taban zemini üzerine serilmiş granüler alttemel ve temel tabakaları üzerine bitümlü kaplamaların serilmesi şeklinde inşa edilirler. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yolu ile doğal zemine dağıtan bir üstyapı şeklidir.

Esnek üstyapı belirli özelliklere sahip malzemelerden oluşmuş bir seri tabakayı içerir. Tabaka kalınlıkları tabanın taşıma gücü ve trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanır [9].

2.4.1 Taban zemini

Yol üstyapısı ve banketlerin oturduğu altyapı zeminin üst yüzeyi olan tesviye yüzeyi altında kalan, yarma veya dolgularda üstyapının taşıma gücüne etkisi olabilecek bir derinliğe kadar (25~85 cm) devam eden tabakadır. Tabanın CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) değeri üstyapı tabakalarının kalınlıklarını belirleyen en önemli faktörlerden birisidir.

Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zemin ya da dolgu malzemesinden oluşur. Bu tabaka, üstyapıya temel görevi yapar. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Trafik yükü son olarak bu tabakaya iletilir. Bu tabakanın görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyacı vardır.

Bir esnek üstyapının davranışı, taban zemininin taşıma gücüyle doğrudan ilgilidir. Taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi, tesviye yüzeyinin en az 100 cm. altında tutulmalıdır, bunu sağlayacak uygun yeraltı drenajı yapılmalıdır. Su, taban zeminlerinin taşıma gücünü azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, suyun etkili ve kalıcı bir drenaj sistemiyle inşaat sırasında ve yolun ömrü boyunca tabandan ve üstyapı tabakalarından uzaklaştırılması sağlanmalıdır. Yol üstyapıları aşırı don kabarması ve tabanın donma çözülme mevsiminde taşıma gücünün azalmasıyla zarar görebilir. Don olayının, yol üstyapısına olan etkisinin azaltılması için üstyapı taban zemininin dona karşı duyarlılığı, üstyapının toplam kalınlığı, donma indeksi, yer altı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği gibi faktörlerin incelenmesi gereklidir [9].

Taşıma gücü düşük taban zeminlerinin dirençlerini arttırmak, belirli koşullarda sahip olduğu direnci her türlü etki altında korumasını sağlamak amacıyla çeşitli katkı

malzemeleriyle stabilizasyon yapılır. Kireçle, portland çimentosuyla ve bitümlü yapılan stabilizasyonlar yaygındır. Orta ve ince taneli zeminler, kireçle stabilize edilerek plastisitetleri düşürülür, şişmesi azaltılır, direnci yükseltilir. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde Kısım 218'de kireç ile zemin stabilizasyonu hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Zemin stabilizasyonu, trafik değerine göre üstyapı projelendirilmesinde temel veya alttemel olarak da değerlendirilebilir. Çimento ile stabilizasyon hafif trafikli yollarda kaplama olarak, orta ve yoğun trafikli yollarda temel tabakası olarak kullanılabilir. Bitümlü malzemelerle zemin stabilizasyonunda ise, zeminler bitümlü bağlayıcı, katran, katbek asfaltları ve asfalt emülsiyonları ile stabilize edilmektedir [10].

2.4.2 Alttemel tabakası

Alttemel tabakası esnek kaplamaların en alt tabakası olup düşük elastisite modülüne veya CBR değerine sahip fakat, iyi drene olabilen granüler malzemelerden yapılır. Alttemel ile granüler temel tabakasının işlevleri açısından aralarında önemli bir fark yoktur. Alttemel tabakası ile granüler temel tabakası arasındaki en önemli fark, daha düşük maliyette daha kalın bir tabakanın inşa edilebilmesidir [6].

Alttemel tabakası, trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince taneli malzemelerin temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek, ayrıca su ve don etkilerine karşı dayanım sağlamak ve tampon bölge görevi yapmak için tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır. Aynı zamanda bu tabaka yol üstyapı inşaatı sırasında iş makinalarının yükünü taban zeminine aktarır ve düzgün yuvarlanma yüzeyi oluşturur [9].

2.4.3 Temel tabakası

Alttemel üzerine, hesaplanan bir kalınlıkta inşa edilen, belirli fiziksel özelliklere sahip malzeme ile oluşturulan, iyi bir drenaj sağlamak, don etkisini azaltmak gibi fonksiyonları olan bir üstyapı tabakasıdır. Temel ve alttemelin ana görevi, yüzeye uygulanan yükleri kendi içinde dağıtmak ve bu şekilde tabanda kesme ve oturma deformasyonlarının oluşmasını önlemektir. Karayollarında üç farklı temel tipi uygulanmaktadır.

- Granüler Temel (GT)

- Plent-Miks Temel (PMT)
- Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT)

2.4.4 Bitümlü temel tabakası

Bitümlü temel tabakası genellikle bağlayıcısız granüler temel üzerine yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımın uygulandığı bir tabakadır. Kullanılan bitüm ve agrega ne kadar uygun olursa yolun taşıma gücü de o kadar artmış olur. Günümüz yollarında bitümlü temel tabakası karayollarının vermiş olduğu dingil yükü miktarına göre hesaplanarak kalınlığı belirlenir. Bu kalınlık, genelde 8-18 cm arasında değişir. Bitümlü temel tabakasının kalınlığı trafik yüküne göre hesaplanır.

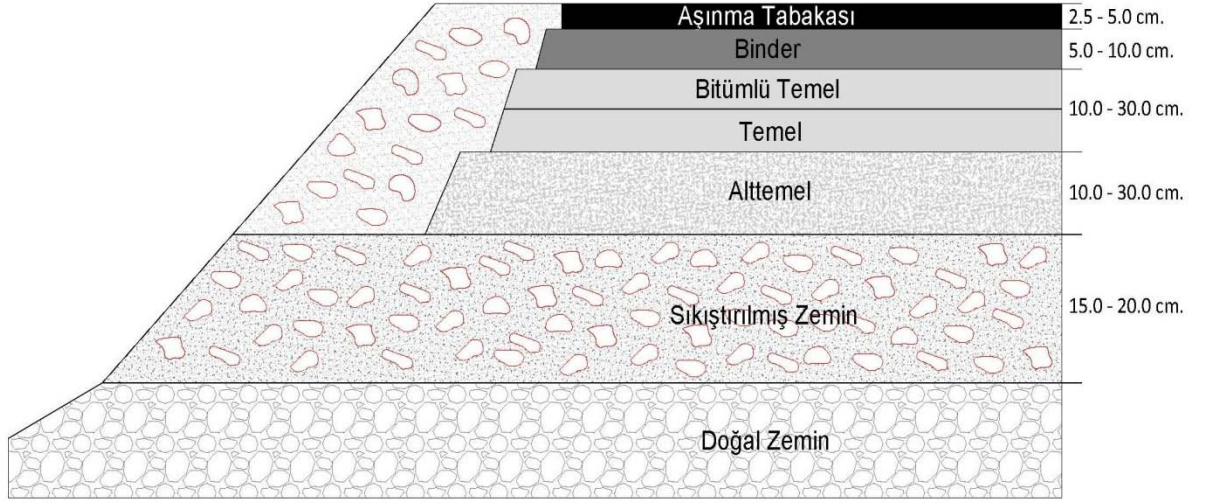
Ağır trafik şartlarının elverdiği yollarda bitümlü temel tabakasının kalınlığını arttırmak daha mantıklıdır. Bu sayede, yolun taşıma gücü arttırılmış olur.

2.4.5 Kaplama tabakası

Kaplama tabakası, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplama tabakası, aşınma ve gerekli ise binder tabakası olmak üzere iki tabaka halinde inşa edilir [9].

Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça yolun trafik yüklerine karşı direnci de artar. Temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmeleri azalır. Yollarda temel tabakası üzerine konan bitümlü kaplama tabakaları, genellikle yapım ve çalışma ilkeleri birbirlerinden oldukça farklı iki tipte yapılır: Yüzeysel (sathi) kaplamalar ve bitümlü karışımlarla oluşturulan kaplamalar.

Tipik bir esnek üstyapı kesiti ve tabakaların kalınlık değerleri Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 : Esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları.

3. ESNEK ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Esnek tür yol üstyapılarında taşıyıcı bünyenin iskeletini sağlamak üzere agregalar, bunların birbirine bağlantısını sağlamak üzere de hidrokarbonlu bağlayıcılar kullanılmaktadır. Doğal olarak agregalar ve bağlayıcı malzemeler için kalite kontrol yöntemleri olacağı gibi, bunların sıcak veya soğuk ortamda karıştırılmasıyla elde edilecek karışımların da kalite kontrol yöntemleri mevcuttur. Günümüzde esnek yol üstyapılarında, hidrokarbonlu bağlayıcı olarak çoğunlukla bitümler kullanılmaktadır [11].

3.1 Bitümlü Bağlayıcılar

Yol inşaatında bitümler ve katranlar olmak üzere iki tür bağlayıcı kullanılmaktadır. Bunlar sıcaklığa bağlı olarak sıvı, yarı katı ve katı halde bulunurlar. Kohezyon ve adezyon bağlayıcıların iki önemli özelliğidir. Katran taş elemanlara, bitüme kıyasla daha iyi yapışabilir ancak, ısıya karşı dayanıksızlığı nedeniyle özellikleri daha çabuk bozulur.

Bitümler, üretildikleri kaynaklar bakımından iki ayrı temelden, yani,

- Doğal asfalt kaynaklardan veya
- Rafine asfalt kaynaklardan

elde edilirler. Günümüzde yol inşaatında, daha ucuz olması nedeniyle, büyük oranda petrolün damıtılması yöntemiyle elde edilen bitümler kullanılmaktadır. Bitümlerin özelliklerinin iyileştirilmesi için çok sayıda kimyasal katkı maddeleri kullanılabilmektedir.

Böylelikle çeşitli amaçlara yönelik olarak değişik asfalt türleri elde edilir. Asfalt çimentoları, likit (katbek) asfaltlar, asfalt emülsiyonları bu türlere örnek olarak gösterilebilir. Hidrokarbonlu bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini saptamak için mevcut olan çok sayıdaki deneyin en önemlileri şunlardır:

- Özgöl Ağırlık Ölçüm Deneyi
- Akışkanlık Özelliklerinin Saptanması Deneyleri
- Viskozite Deneyi ve Penetrasyon Deneyi
- Yüzdürme Deneyi ve Yumuşama Noktası Deneyi
- Düktilite Deneyi ve Yanma Noktası Deneyi
- Damıtma (Distilasyon) Deneyi
- Eriticilerde Erime Deneyi [9].

Bitümle elde edilen karışımlar; aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Sıcaklık artmasıyla birlikte bitüm agregaya püskürtülerek karıştırılır. Meydana gelen karışım soğuduğunda oldukça katı ve dayanıklıdır. Bu karışımlar, trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz oldukları için temel ve alttemel tabakalarına göre stabil ve durabil olmalıdırlar. Bu tabakalar ayrıca taşıtlar için düzgün pürüzsüz yüzeyleri ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleriyle sürüş emniyetini sağlamalı, trafiğin ve çevrenin aşındırma etkilerine, deformasyonlara karşı dirençli olmalıdır [6].

Kaplama sınıfı bitümlerin TS EN 12591'de belirtilen özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir [12].

3.2 Agregalar

Doğal kaynaklardan veya yapay olarak elde edilebilen agregalar tane çaplarına göre İri Agregat - İnce Agregat - Mineral Filler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılabilir. Yol inşaatında doğal taş malzeme kaynaklarından, püskürük, tortul ve metamorfik kayalardan kırma, eleme ve bazen yıkama işlemleriyle elde edilen diyorit, diyabaz, trakit, bazalt, kalker, kireçtaşı, dolomit, kumtaşı, çakmaktaşı kökenli agregalar, ayrıca mekanik dirençleri yüksek olan kum ve çakıl gibi doğal agregalar kullanılmaktadır.

Esnek yol üstyapılarında kullanılan yapay agregalar doğal oluşumdan ziyade insan yapımıdır. Kaplama malzemesi yapımında demir ve çelik üretimi sırasında meydana gelen fırın cürufu ve çelik cürufu kullanılabilir. Çelik endüstrisinin rasyonelleşmesiyle, kaynakların sayısı etkili bir şekilde azalmıştır. Tuğla üretiminde

meydana gelen atık ve yıkım artıkları çok hafif trafiğe sahip yollarda temel malzemesi olarak kullanılabilir [13].

Çizelge 3.1 : Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri.

Deney Adı	Deney Standardı	Bitüm Sınıfları				
		B 40 /60	B 50 /70	B 70 /100	B 100 /150	B 160 /220
Penetrasyon, (25°C) 0,1 mm	TS EN 1426	40 - 60	50 - 70	70 - 100	100 - 150	160 - 220
Yumuşama Noktası, °C	TS EN 1427	48 - 56	46 - 54	43 - 51	39 - 47	35 - 43
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C'de, 5 saat)						
<i>Kütle Değişimi, % maks.</i>	TS EN 12607-2	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0
<i>Kalıcı Penetrasyon, % min.</i>	TS EN 1426	50	50	46	43	37
<i>Yumuşama Noktası, °C min.</i>		49	48	45	41	37
<i>Yumuşama Noktası Yükselmesi, °C maks.</i>	TS EN 1427	9	9	9	10	11
Parlama Noktası, °C min.	TS EN ISO 2592	230	230	230	230	220
Çözünürlük, % min.	TS EN 12592	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Fraass Kırılma Noktası, °C maks. *	TS EN 12593	-7	-8	-10	-12	-15
Parafin Mumu İçeriği, % maks. **	TS EN 12606-1 TS EN 12606-2	2,2 4,5	2,2 4,5	2,2 4,5	2,2 4,5	2,2 4,5

* Soğuk bölgelerde kullanılacak bitümlere yapılacaktır.

**Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

Esnek yol kaplamalarında kullanılacak agreganın, kökeni ne olursa olsun, her kaplama türü için, şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir. Agregaların özelliklerinin yeterli olup olmadığını saptamak için kullanılabilecek çok sayıda deney içinde en önemli ve en çok uygulanan deneyler şunlardır:

- Tane Dağılımı (Granülometri) Deneyi
- Aşınmaya Karşı Direnç Deneyi
- Hava Etkilerine Karşı Dayanıklılık (Donma - Çözülme) Deneyi
- Cilalanma Direnç Deneyi
- Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi
- Soyulmaya Karşı Direnç Deneyi

Karışımlarda kullanılması düşünülen kaba agregaların bağlayıcı ile yeterli adezyon oluşturabilmesi için yüzeylerinin, pürüzlü kil ve silt gibi çamurlu maddelerden arındırılmış olması gerekir. Bu nedenle, esnek tip yol üstyapı kaplamalarında çakıl türü cilalanmış yüzeyli agregalar yerine kırmataş (mıcır) daima tercih edilmelidir [9].

3.2.1 Alttemel tabakası

Temel ve alttemel tabakaları, kaplama tabakaları altına yapılan ve bir çeşit temel görevi gören üstyapı elemanlarıdır. Kaplamaya nazaran daha az fakat sıkıştırılmış zemine göre daha fazla gerilme aldıklarından dolayı kaplamaya göre daha düşük stabiliteye sahiptirler. Temel ve alttemel tabakaları kaplamadan intikal eden yükleri zemine yaymak, drenaj, deformasyon etkilerine dayanım, don etkilerini önlemek gibi işlevleri yerine getirirler. Dolayısıyla bu tabakaların yüksek stabiliteli ve yüksek dren kabiliyetli olmaları istenir. Temel ve alttemelin bu fonksiyonları yerine getirebilmelerini bu tabakalarda kullanılan malzemelerin kaliteleri önemli ölçüde etkiler. Bu tip tabakalarda kullanılan agregaların, yüksek stabiliteye, drenaj için yeterince boşluklu gradasyona, yüksek CBR ve içsel sürtünme açılarına sahip olmalarına dikkat edilmelidir. Ayrıca bu tabakadaki malzemelerin filler oranı düşük, kübik ve açısız şekilli ve pürüzlü yüzeylere sahip fakat, yassı ve ince uzun taneler ihtiva etmeyen, don duyarlılığı düşük agregalardan oluşması sağlanmalıdır [6].

Alttemel yapımında kullanılacak malzeme; kum, çakıl, teras çakılı, ayrışmış, bozuşmuş kaya, cüruf, kırmataş ve benzeri malzemelerden oluşacaktır. Alttemel malzemesi, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilen ve AASHTO T-27, T-11 veya TS 1900 standartlarında belirtilen yöntemler ile bulunan granülometri, Çizelge 3.2'de verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır [14].

Alttemel malzemesi, kum-çakıl ocaklarından sağlandığında, tüvenan malzemenin granülometrisi Tip-A granülometri limitlerine uygun olacaktır. Granülometrisi Tip-A limitlerine uymayan malzemeler elenerek granülometrisi ayarlanacaktır. Alttemel malzemesinin kum-çakıl veya taş ocaklarında kırılarak hazırlanması durumunda, malzemenin granülometrisi Tip-B granülometri limitlerine uygun olacaktır. Kum-çakıl ocağında kırılarak malzeme hazırlanması durumunda 4,75 mm elek üzerinde kalan kısmının en az % 50'sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olacaktır. Taş ocağında alttemel malzemesi kırımında yassılık indeksi % 40'tan az olacaktır.

Çizelge 3.2 : Alttemel malzemesi granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		%Geçen	
mm	inç	Tip - A	Tip - B
75	3	100	-
50	2	-	100
37.5	1 ½	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	¾	70 - 100	-
9.5	¾	45 - 80	30 - 70
4.75	No.4	30 - 75	25 - 60
2.00	No.10	-	15 - 40
0.425	No.40	10 - 25	10 - 20
0.075	No.200	0 - 12	0 - 12

Malzemenin; 0,075 mm eleği geçen kısmı 0,425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmayacaktır.

Alttemel yapımında kullanılacak olan malzemenin diğer fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'de belirtilen özelliklere uyacaktır.

Çizelge 3.3 : Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri [14].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	20	TS-3655 AASHTO T - 104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	50	TS-3694 AASHTO T - 96
Likit Limit maksimum %	25	TS-1900 AASHTO T - 89
Plastisite İndeksi maksimum %	6	TS-1900 AASHTO T - 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı maksimum %	<u>İri Malzeme</u> (4,75 mm elek üstü) 2	<u>İnce Malzeme</u> (4,75 mm elek altı) 2 ASTM C-142
Organik Madde %	1	AASHTO T-194

Modifiye Proctor Deneyi (AASHTO T193, TS 1900) ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın % 97'sine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri Tip-A için minimum % 30, Tip-B için ise minimum % 50 olacaktır.

Alttemel malzemesinin plentte karıştırılıp finişer ile serilmesi durumunda, plent-miks alttemel olarak tanımlanacak ve bu durumda Tip-B granülometri limitlerine uyulacaktır.

Sıkıştırma, statik çizgisel yükü 30 kg/cm²'den büyük olan kendi yürür düz bandajlı vibrasyonlu silindirler veya lastik başına düşen yükü 3500 kg' dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırıcılarla yapılmaktadır. Alttemel malzemesi, Çizelge 3.4'te verilen değerler esas alınarak sıkıştırılacaktır [14].

Çizelge 3.4 : Alttemel sıkıştırma kriterleri [14].

TİP-A	Sıkışma, Minimum %	95	Modifiye Proctor TS1900,
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 2$	AASHTO T- 180
TİP-B	Sıkışma, Minimum %	97	Modifiye Proctor TS1900,
	Optimum Su İçeriği %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$	AASHTO T- 180

3.2.2 Temel tabakası

Temel tabakaları granüler temel, plent-miks temel, çimento bağlayıcılı stabilize temel olmak üzere üç farklı tipte inşa edilmektedir.

Bu üç tip temel tabakasında kullanılacak agrega, çakıl, kırılmış çakıl, kırma taş, kum, cüruf veya benzeri malzemelerden hazırlanacaktır. Malzemeyi oluşturan ince ve kaba agregalar ile ilgili özellikler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir [14].

Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak Çizelge 3.7'de verilen granülometri limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin, su ile karıştırılması ve şartnamesine uygun olarak hazırlanmış, taşıma gücü yeterli taban veya alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Çizelge 3.5 : Temel tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri [14].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	15	TS-3655 AASHTO T - 104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	40	TS EN 1097-2 AASHTO T - 96
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı maksimum %	1 (4,75 mm elek üstü)	ASTM C-142
Organik Madde %	Bulunmayacak	AASHTO T-194
Diğer zararlı maddeler maksimum %	1	

Çizelge 3.6 : Temel tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri [14].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Likit Limit maksimum %	25	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite İndeksi maksimum %	6	TS 1900 AASHTO T-90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı maksimum %	1 (4,75 mm elek altı)	ASTM C-142
Organik Madde maksimum%	0,5	AASHTO T-194
Renk Skalası	0-1	TS 3673
Diğer zararlı maddeler maksimum %	1	

Granüler temel malzemesinin 4,75 mm elek üzerinde kalan kısmının ağırlıkça en az % 50'sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olacaktır. Malzemenin 0,075 mm eleği geçen kısmı, 0,425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmayacaktır.

Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda kullanılacak granüler temel (GT) malzemesi granülometrisi A, B tiplerinden birine uygun olacaktır. Sathi kaplama yapılacak yollarda ise, projede belirtilen temel tabakası kalınlığı 20 cm'den az ise, tabakanın tümü C tipi granüler temel malzemesi ile yapılacaktır. Projede belirtilen temel

tabakası kalınlığı 20 cm veya daha fazla ise tabaka, A, B veya C tipi granüler temel malzemelerinden biri ile oluşturulacaktır.

Çizelge 3.7 : Granüler temel tabakası granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		% Geçen		
mm	inç	A	B	C
50	2	100	-	-
37.5	1 ½	80 - 100	100	-
25	1	60 - 90	70 - 100	100
19	¾	-	60 - 92	75 - 100
9.5	¾	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4.75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0.425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0.075	No.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

GT malzemesi Çizelge 3.8'de verilen değerler esas alınarak sıkıştırılacaktır. Sıkıştırmada, statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den büyük olan, kendi yürür, düz bandajlı, vibrasyonlu silindirler ve/veya lastik başına düşen yükü, en az 3500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılacaktır. Kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun olan sıkıştırma tekniği, işin başında bir deneme kesimi yapılarak belirlenecektir [14].

Çizelge 3.8 : Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri [14].

Minimum % Sıkışma	98	Modifiye Proctor TS1900 AASHTO T-180
	95	Titreşimli Tokmak TS 1900 BS 1377
Optimum Su İçeriği %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$ $W_{opt} \pm 1$	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

Plent-miks temel tabakası; kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 3.9'da verilen granülometri limitleri içinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda suyla bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Çizelge 3.9 : Plent-miks temel tabakası granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	inç	Tip - I	Tip - II
37.5	1 ½	100	-
25	1	72 - 100	100
19	¾	60 - 92	80 - 100
9.5	¾	40 - 75	50 - 82
4.75	No.4	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	20 - 45	23 - 50
0.425	No.40	8 - 25	12 - 30
0.075	No.200	0 - 10	2 - 12

Sıkıştırma, statik çizgisel yükü, 30 kg/cm'den daha büyük olan kendi yürür düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü en az 3500 kg olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılarla yapılacaktır. Yeterli sıkıştırma ile erişilmesi istenen minimum sıkışma yüzdeleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Plent-miks temel tabakası sıkıştırma kriterleri [14].

Minimum % Sıkışma	100	Modifiye Proctor TS1900 AASHTO T-180
	97	Titreşimli Tokmak TS 1900 BS 1377
Optimum Su İçeriği %	$(W_{opt} - 1) - W_{opt}$ $W_{opt} \pm 0.5$	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 3.11'de verilen granülometri limitleri içinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanır. Bu tabaka, malzemenin uygun oranlarda çimento ve su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan karışımın bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır [14].

Çizelge 3.11 : ÇBGT tabakası granülometri limitleri [12].

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	inç	
37.5	1 ½	100
25	1	72 - 100
19	¾	60 - 92
9.5	¾	40 - 75
4.75	No.4	30 - 60
2.00	No.10	20 - 45
0.425	No.40	8.25
0.075	No.200	0 - 10

3.2.3 Bitümlü temel tabakası

Kırılmış ve elenmiş kaba agregası, ince agregası ve mineral fillerin belirli granülometri limitleri arasında, işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak serilip, sıkıştırılmasıyla oluşturulan temel tabakasıdır. Granülometri limitleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Bitümlü temel tabakası granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	inç	Tip - A	Tip - B
37.5	1 ½	100	100
25	1	72 - 100	80 - 100
19	¾	60 - 90	70 - 90
12.5	1/2	50 - 78	61 - 81
9.5	¾	43 - 70	55 - 75
4.75	No.4	30 - 55	42 - 62
2.00	No.10	18 - 42	30 - 47
0.425	No.40	6 - 21	15 - 26
0.180	No.80	2 - 13	7 - 17
0.075	No.200	0 - 7	1 - 8

Bitümlü temelde kullanılacak ince agregası kırılmış, elenmiş taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşacaktır. İnce agregası, agregası karışımının 4,75 mm (No.4) lik elekten geçip 0,075 mm, (No.200) elekten kalan kısmı olup, temiz, sağlam ve dayanıklı olacak ve Çizelge 3.13'te verilen özelliklere sahip bulunacaktır [14].

Çizelge 3.13 : Bitümlü temel tabakasında kullanılan ince agreganın özellikleri [14].

Özellikler	Deney Metodu	Şartname Limitleri
Plastisite İndeksi, maksimum %	TS 1900	2
Kil Topakları Ve Ufalanabilir Taneler, maksimum, %	ASTM C-142	1
Organik Madde Miktarı, maksimum %	TS EN 1744-1 (AASHTO T - 194)	0 -1 (Renk skalası) (0,5)

Kaba agrega ise; kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşacaktır. Kaba agrega, agrega karışımının 4,75 mm (No.4) lik elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı tanelerden ibarettir. Kaba agrega içinde yumuşak ve dayanıksız parçalar, kil, organik ve diğer zararlı maddeler serbest veya agrega tanelerini sarmış halde bulunmayacaktır. Kaba agregada aranan özellikler Çizelge 3.14'te verilmektedir [14].

Çizelge 3.14 : Bitümlü temel tabakasında kullanılan kaba agreganın özellikleri [14].

Deney	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Aşınma Kaybı (Los Angeles), maks %	35	TS EN 1097-2 (ASTM C-131)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp, maksimum %	12	TS EN 1367-1 (ASTM C-88)
Kırılmışlık (en az iki yüzü), ağırlıkça, minimum %	100	-
Yassılık İndeksi, maksimum %	35	BS 812
Su Absorpsiyonu, maksimum %	2.5	ASTM C-127
Soyulma Mukavemeti, minimum %	50	403. Kısım EK-A
Kil Topakları Ve Ufalanabilir Taneler, maksimum, %	1	ASTM C-142
* Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci ,İndirek Çekme Mukavemeti Oranı, min.%	80	AASHTO T-283
* Bu deney zorunlu değildir, gerek duyulduğunda yapılacaktır.		

Bitümlü temelin karışım tasarımı TS 3720 "Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları" standardına göre Marshall yöntemi kullanılarak yapılacaktır. Bitümlü temel tabakası için tasarım ölçütleri Çizelge 3.15'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.15 : Bitümlü temel tasarım kriterleri [14].

Özellikler	Min.	Maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75	
Marshall Stabilitesi, kg	600	-
Boşluk, %	4	7
Asfaltla Dolu Boşluk, %	55	70
Agregalar Arası Boşluk (Vma),%	12	-
Akma, mm (10^{-2} inç)	2 (0.08 inç)	5 (0.20 inç)
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,0	5,5

Karışım yola serildikten hemen sonra sıkıştırma işlemine başlanacaktır. Silindirme başladığında karışımın sıcaklığı 135°C'nin altında olmayacak ve karışımın sıcaklığı 80°C'nin altına düşmeden sıkıştırma işlemi tamamlanmış olacaktır.

Sıkıştırma işleminde statik ağırlığı 8-12 ton arasında demir bandajlı silindirler ile lastik basıncı ayarlanabilen, kendinden yürür, minimum 20 tonluk lastik tekerlekli silindirler kullanılacaktır. Günlük 600 tondan fazla sermelerde her 400 ton için bir demir bandajlı silindir ilave edilecektir [14].

3.2.4 Kaplama tabakası

Kırılmış ve elenmiş kaba agregası, ince agregası ve mineral fillerin belli granülometri limitleri arasında, işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak asfalt betonu kaplama yapılması ile oluşur.

Kaplama tabakası, asfalt betonu aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Karışımın agregası granülometrisi binder tabakası için Çizelge 3.16'da, aşınma tabakası için de Çizelge 3.17'de verilmiştir.

Kaba agregası; kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşacaktır. Agregası karışımının 4,75 mm'lik (No. 4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı tanelerden oluşacaktır. Kaba agregası içinde yumuşak ve dayanıksız parçalar, kil, organik ve diğer zararlı maddeler serbest veya agregası tanelerini sarmış halde bulunmayacaktır.

Çizelge 3.16 : Binder tabakası için granülometri limitleri [14].

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

Çizelge 3.17 Aşınma tabakası için granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		%Geçen	
mm	inç	Tip-1	Tip-2
19	3/4	100	-
12,5	1/2	83 - 100	100
9,5	3/8	70 - 90	80 - 100
4,75	No.4	40 - 55	55 - 72
2,00	No.10	25 - 38	36 - 53
0,425	No.40	10 - 20	16 - 28
0,180	No. 80	6 - 15	8 - 16
0,075	No.200	4 - 10	4 - 10

Karışıma giren kaba agregâ, çakıldan hazırlanmış ise 4,75 mm'lik (No. 4) elek üzerinde kalan kısmının % 100'ünün iki veya daha fazla yüzü mekanik olarak kırılmış olacaktır. Kaba agregada aranan fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.18'de verilmektedir [14].

4,75 mm'lik (No.4) elekten geçip 0.075 mm'lik (No. 200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanan ince agregâ, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşacaktır. İnce agregâ temiz, sağlam ve dayanıklı olacak, plastisite indeksi % 2'den fazla olmayacaktır.

Karışımında kullanılacak doğal kum, ince agregâ özelliklerine sahip olacak ve miktarı karışımdan istenilen stabilite, akma, boşluk değerlerinin sağlanması şartıyla tespit edilecektir. İnce agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 3.19'da verilmektedir [14].

Çizelge 3.18 : Kaplama tabakasında kaba agreganın fiziksel özellikleri [14].

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (donma deneyinde Na ₂ SO ₄ ile) kayıp , maksimum %	12	10	TS EN 1367-1 (ASTM C- 88)
Aşınma Kaybı (Los Angeles) , maksimum %	35	30	TS EN 1097-2 (ASTMC-131)
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça minimum %	100	100	-
Yassılık İndeksi maksimum %	35	30	BS 812
Cilalanma Değeri minimum %	-	50	TS EN 1097-8
Su Emme Değeri maksimum %	2,5	2,0	(ASTMC-127)
Soyulma Mukavemeti minimum %	50	50	EK-A
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı , maksimum %	0,5	0,5	ASTM C-142
İndirek Çekme Mukavemeti Oranı , minimum %	80	80	AASHTO T-283

Çizelge 3.19 : Kaplama tabakasında ince agreganın fiziksel özellikleri [14].

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Plastisite İndeksi maksimum %	2	2	TS 1900
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı maksimum %	0,5	0,5	ASTM C-142
Organik madde miktarı maksimum %	0 - 1 (Renk skalası) 0,5	bulunmayacak	TS EN 1744-1 (AASHTO T - 194)

İdare tarafından başka bir karışım tasarım yöntemi tayin edilmedikçe, asfalt betonunun karışım tasarımı TS-3720 “Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları” standardına göre Marshall yöntemi kullanılarak yapılacaktır.

Asfalt betonu karışımların tasarımında; Çizelge 3.20'de verilen tasarım kriterleri esas alınacaktır.

Çizelge 3.20 : Kaplama tabakası tasarım kriterleri [14].

Özellikler	Binder		Aşınma	
	min.	maks.	min.	maks.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75		75	
Marshall Stabilitesi, Kg	750	-	900	-
Boşluk, %	4	6	3	5
Asfaltla dolu boşluk, %	60	75	65	75
Agregalar arası boşluk, %	13	-	14	-
Akma, mm (10^{-2} inç)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)
Filler/bitüm oranı	-	1,4	-	1,5
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0

4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ VE CÜRUF OLUŞUMU

4.1 Demir Çelik Sektörü

Demir çelik sektörü dünyadaki ekonomik gelişmelerle ve ülkelerin ekonomik gücüyle doğrudan ilişkili bir sektördür. Ekonomik kalkınmanın temeli, güçlü bir demir çelik sektörüne sahip olmaktır. Bu sektörün önemi, tüm endüstriyel dallara girdi vermesinden kaynaklanmaktadır.

Otomotivden inşaata, tarımdan sağlık gereçlerine ve dayanıklı tüketim mallarına kadar her alanda hayatımızın içinde olan çelik, binlerce yıldan beri insanoğlu tarafından çeşitli yöntemlerle üretilmiş ve kullanılmıştır. Çelik üreterek onu tarımdan savunmaya kadar değişik alanlarda kullanabilmek, çeliğin icadından bu yana uluslar için bir üstünlük ve güç kaynağı olmuştur.

Dünya'da demir çelik üretimi 2000'li yıllara kadar ağırlıklı olarak kamuya bağlı şirketler tarafından yapılmaktaydı. Ancak, daha sonraki yıllarda demir çelik tesisleri özelleştirilmiş ve özel şirketler sektörde önemli paya sahip olmuştur. 2002 yılından itibaren gelişmekte olan ülkelerde yaşanan aşırı talep artışları bu süreci hızlandırmıştır [15].

Dünya ham çelik üretimi sürekli bir artış eğilimi içinde bulunmaktadır. Çizelge 4.1'de 2002-2012 döneminde Dünya'daki ve Türkiye'deki ham çelik üretim miktarları gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, dünyada ham çelik üretimi 2012 yılında, 2010 yılına göre yaklaşık %5,5'lik bir artış göstermiştir. Türkiye'de ise aynı dönemde %23,4'lük bir artış görülmüştür.

Çizelge 4.2'de ise, 2012 yılına göre dünya ham çelik üretiminde ilk 15 sırayı alan ülkeler gösterilmiştir. Ayrıca bu ülkelerin 2010 ve 2012 yıllarına ait ham çelik üretimleri ve bu yıllar arasındaki değişim oranları gösterilmiştir.

Türkiye, 2012 yılında 35,9 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 - 2012 yılları arasında ilk 15 ülke içinde en büyük üretim artışını gerçekleştiren ülke olmuştur.

Çizelge 4.1 : Yıllık ham çelik üretim miktarları [16].

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

Çizelge 4.2 : Başlıca ham çelik üreticisi ülkeler ve üretim miktarları [16].

Sıra	Ülke	Üretim (Milyon Ton)		Değişim (%)
		2010	2012	
1	Çin	637,4	708,8	11,2
2	Japonya	109,6	107,2	-2,2
3	ABD	80,5	88,6	10,1
4	Hindistan	68,3	76,7	12,3
5	Rusya	66,9	70,6	5,5
6	Güney Kore	58,9	69,3	17,7
7	Almanya	43,8	42,7	-2,5
8	Türkiye	29,1	35,9	23,4
9	Brezilya	32,9	34,7	5,5
10	Ukrayna	33,4	32,9	-1,5
11	İtalya	25,7	27,2	5,8
12	Tayvan	19,8	20,7	4,5
13	Meksika	16,9	18,2	7,7
14	Fransa	15,4	15,6	1,3
15	İran	12,0	14,5	20,8

1800'lerin ortasından itibaren pik demiri çeliğe dönüştürmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Günümüzde en önemli iki yöntem Bazik Oksijen Fırını (BOF) ve Elektrik Ark Fırını (EAF) yöntemleridir. Her ikisi yöntem de karbon çeliklerinin ve alaşımlı çeliklerin kullanımında kullanılır [17].

Türkiye'de demir çelik üretimi yapan birçok tesis vardır. Türkiye Demir Çelik Üreticileri Derneği (DÇÜD) üyesi olan bazı kuruluşların isimleri ve 2012' deki üretim miktarları, üretim yöntemlerine göre Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4' te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Türkiye' deki BOF tesisleri ve üretim miktarları (2012) [18].

Firma	Yerleşim Yeri	Üretim (ton/yıl)
Ereğli Demir Çelik	Ereğli	3.236.162
İskenderun Demir Çelik	İskenderun	4.630.531
Kardemir Karabük Demir Çelik	Karabük	1.458.319

Çizelge 4.4 : Türkiye' deki EAF tesisleri ve üretim miktarları (2012) [18].

Firma	Yerleşim Yeri	Üretim (ton/yıl)
Asil Çelik	Bursa	321.912
Çebitaş	İzmir	296.055
Çemtaş	Bursa	114.480
Çolakoglu	Kocaeli	2.604.534
Diler	Kocaeli	1.393.415
Ede Demir	İzmir	260.037
Ege Çelik	İzmir	995.082
Ekinciler	İskenderun	940.790
İçdaş	Çanakkale	4.083.100
İzmir Demir Çelik	İzmir	1.431.582
Kaptan	Tekirdağ	1.273.646
Kroman	Kocaeli	1.375.745
MMK Metalurji	Hatay	789.316
Nursan	Hatay	1.103.058
Özkan	İzmir	526.902
Sider	İzmir	538.382
Sivas Demir Çelik	Sivas	335.386
Tosçelik	Osmaniye	1.563.293
Yazıcı	İskenderun	1.061.668
Yeşilyurt	Samsun	625.292
Yolbulan-Baştuğ	Osmaniye	1.513.988

Türkiye'de bulunan demir çelik tesislerinin 2012 yılına göre ülke genelindeki dağılımı, kapasiteleri ve bölgelere göre üretim miktarları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Türkiye'de ki demir-çelik kuruluşları ve üretim kapasiteleri [18].

4.2 Demir-Çelik Üretimi

Demir ve çelik üretiminde kullanılan başlıca cevher, hematit (Fe_2O_3)'tir. Diğer demir cevherleri, manyetit (Fe_3O_4), siderit (FeCO_3) ve limonittir ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, x tipik olarak 1.5'dir). Demir cevherleri %50-%70 arası demir içerir. Demir-çelik üretiminde demir cevherlerinin yanı sıra, hurda demir-çelik de kullanılmaktadır.

Demiri cevherden indirgemek için gerekli diğer hammaddeler kok ve kireç taşıdır. Kok yüksek karbonlu yakıt olup, bitümün, kömürün sınırlı oksijen atmosferinde birkaç saat ısıtılması ve su püskürtülmesiyle elde edilir.

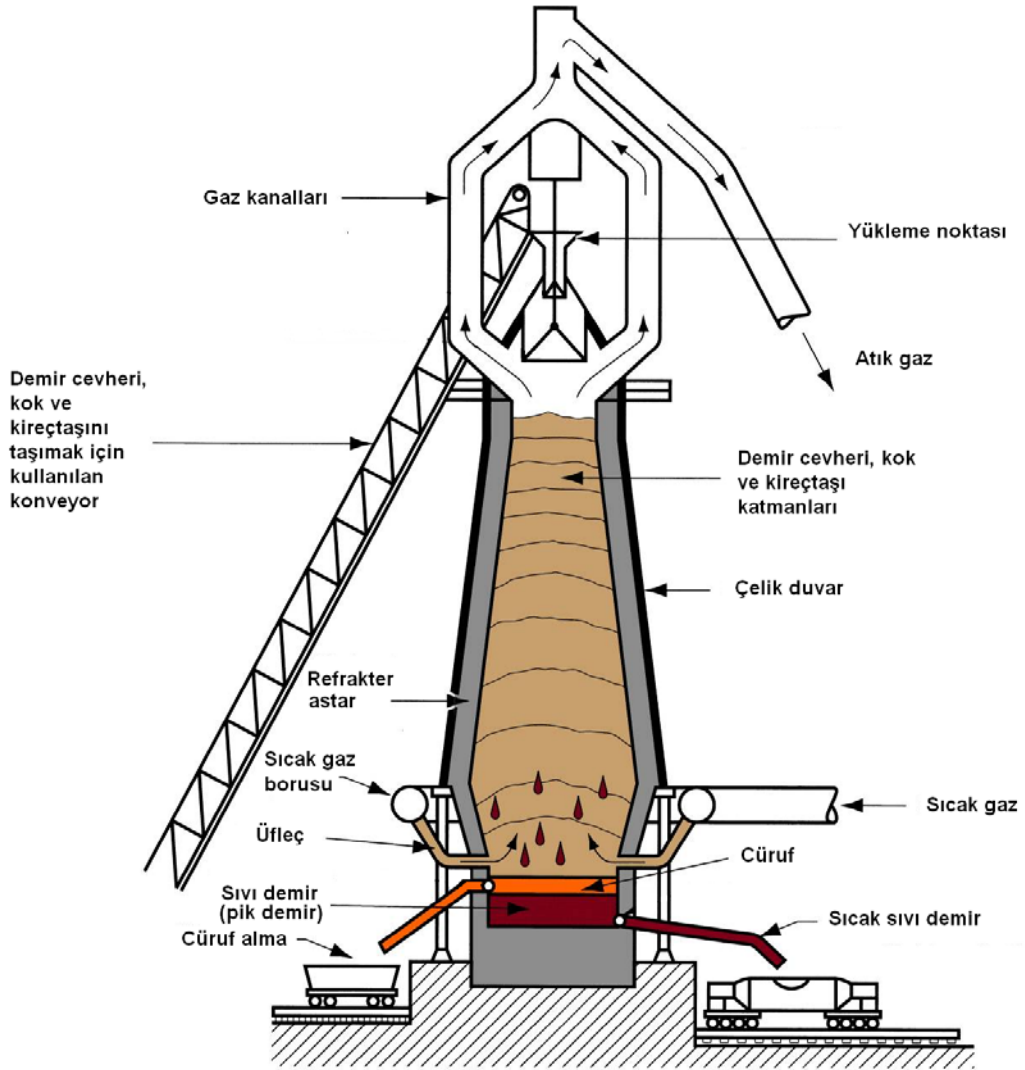
Cevherden demir indirgeme işleminde, kokun iki işlevi vardır:

- 1) Kimyasal tepkimeler için ısı sağlar.
- 2) Demir cevherini indirgemek için gerekli olan CO'ü üretir.

Kireç taşı ise, yüksek oranda kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren bir kayadır.

Demir üretmek için demir cevheri, kok ve kireç taşı, yüksek fırının tepesinden yüklenir. Yüksek fırın refrakter astarlı bir fırın olup, çapı 9-11m, boyu ise 40m'dir

(Şekil 4.2). Fırının alt tarafından yüksek sıcaklıktaki gazlar yüksek hızlarda fırına verilir. Böylece yanma ve indirgenme sağlanmış olur. Yükleme malzemeleri fırının tepesinden aşağı doğru yavaşça iner. İçeri verilen sıcak gazlar sayesinde 1650°C'ye kadar ısıtılırlar. Kok yanması, sıcak gazlar (CO, H₂, CO₂, H₂O, N₂, O₂ ve yakıtlar) tarafından sağlanır. Bu gazlar yukarı doğru çıkarken katmanlardan geçerek, sıcaklığın artmasını sağlar. CO sıcak gaz olarak fırına verilir ve ayrıca kokun yanmasıyla da oluşur.



Şekil 4.2 : Yüksek fırın [17].

1 ton demir üretmek için 7 ton hammadde gereklidir. 2 ton demir cevheri, 1 ton kok, 0,5 ton kireç taşı ve 3,5 ton gaz gereklidir. Yan ürünlerin büyük bölümü yeniden kazanılır. Yüksek fırından alınan demir (pik demir) %4'ten fazla karbon (C) ile %0.3-1.3 silisyum (Si), %0.5-2 mangan (Mn), %0.1-1 fosfor (P) ve %0.02-0.08

kükürt (S) içerir. Dökme demir ve çelik üretimi için ilave rafine işlemleri gerekir [17].

Çelik üretimi temel olarak, demirdeki istenmeyen bazı elementlerin oksitlenerek uzaklaştırılmasını kapsamaktadır. Farklı çelik üretim işlemlerine bağlı olarak kullanılan metal de değişiklik göstermektedir. Çelik üretiminde; işleme bağlı olarak, yüksek fırından çıkan pik demir, hurda metal veya sünger demir ana hammadde olarak kullanılmaktadır [19].

Türkiye’de 2010 yılında 29,1 milyon ton olan ham çelik üretiminin 8,2 milyon tonluk bölümü (%28,3) bazik oksijen fırınında (BOF), 20,9 milyon tonluk bölümü (%71,7) ise elektrik ark fırınlarında (EAF) gerçekleştirilmiştir.

Dünya genelinde EAF ve BOF yöntemi ile yapılan üretimin yanı sıra, çok küçük oranda kullanılan üçüncü bir yöntem ise açık ocak (OHF) ile yapılan üretimdir. Dünya ham çelik üretiminde BOF oranı %61, EAF oranı %34 iken OHF oranı %4 civarındadır.

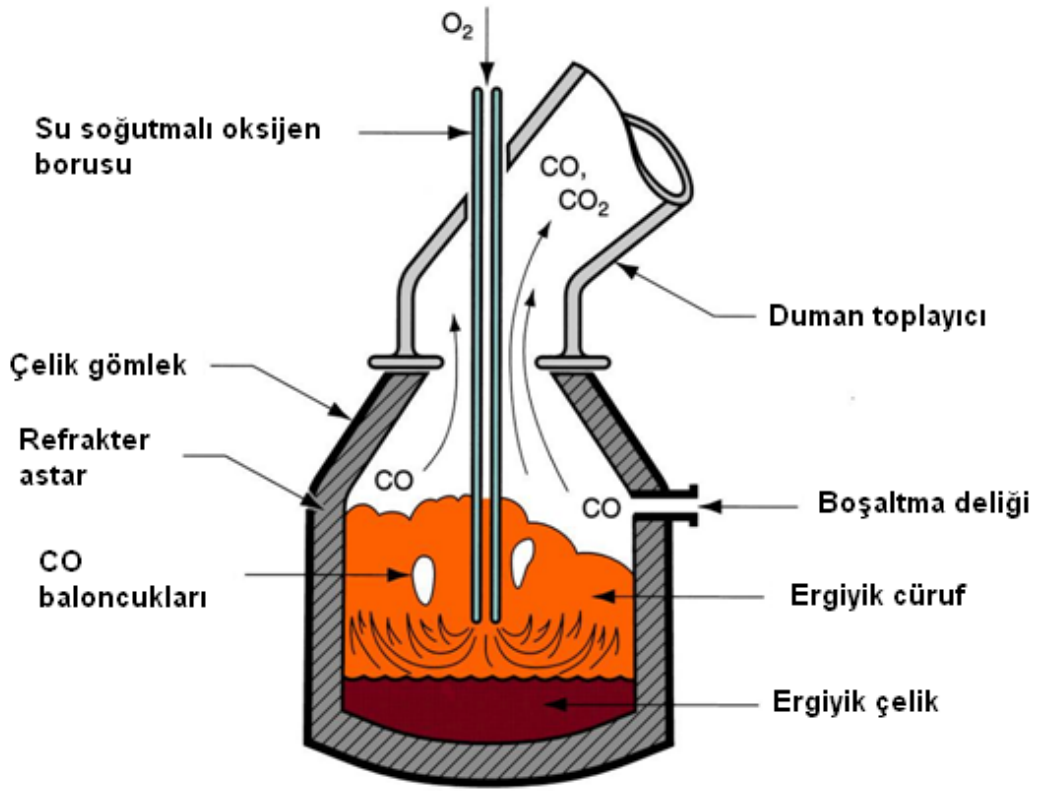
4.2.1 Bazik oksijen fırını (BOF)

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 (sıvı pik) 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

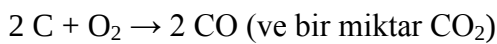
diğer elemanların oksijen ile yanması sırasında verdikleri ısı hurdanın yalnız küçük kısmını eritir. Bu bakımdan fırınların uygun miktarlarda sıcak pik demir, hurda veya cevher ile şarj edilmesi gerekir [20].

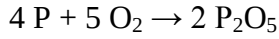
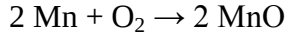
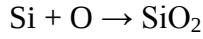
A.B.D.'deki çelik üretiminin %70'i BOF yöntemiyle gerçekleştirilir. BOF, Bessemer dönüştürücüsünün daha gelişmiş halidir. Bessemer işleminde ergimiş pik demirdeki istenmeyen elementleri oksitlemek için hava üflenirken, BOF işleminde saf oksijen kullanılır. Tipik BOF 5m çapında olup, bir defada 150-200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



Şekil 4.3 : Bazık oksijen fırını [16].

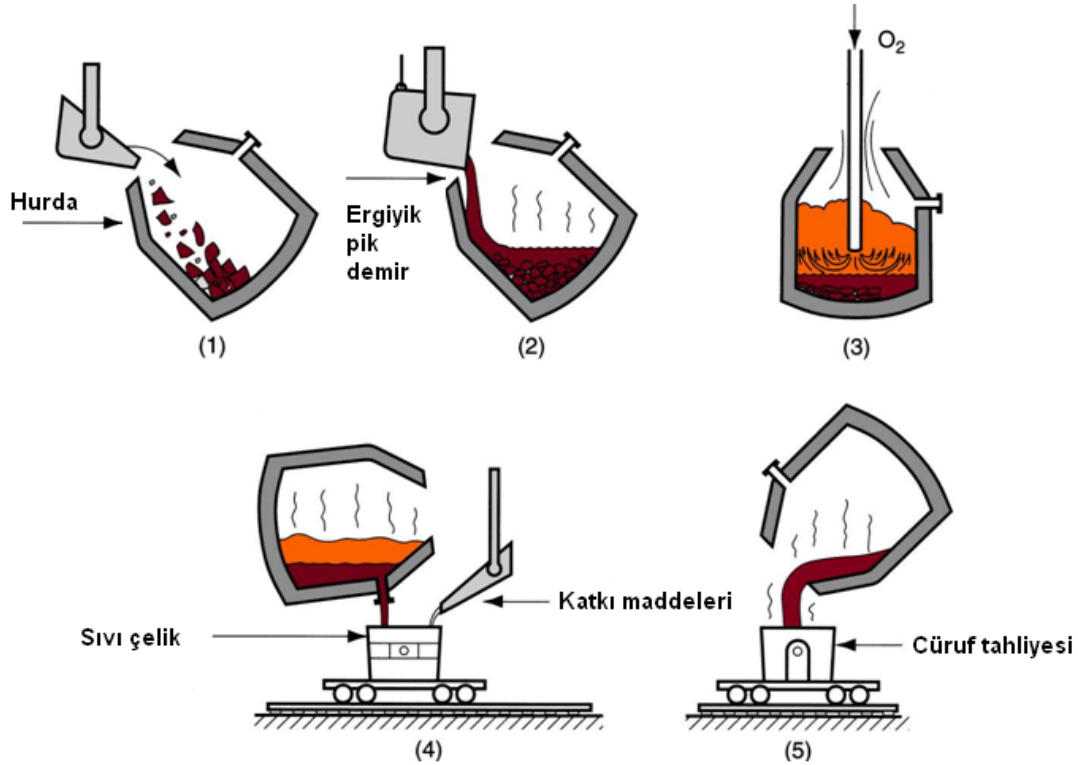
Çelik üretim tesislerinde ergimiş pik demir yüksek fırından alınıp BOF'na taşınır. Hammadde olarak hurda demir-çelik de kullanılır. Ayrıca kireç (CaO) ilave edilir. Yüklemeden sonra saf oksijen borusu fırına daldırılır. Bu borunun alt ucu ergimiş demir yüzeyinin 1,5m üzerinde olacak şekilde ayarlanır. Saf O₂ 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:





İlk tepkimede üretilen CO ve CO₂ 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 yükleme, (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 [17].



Şekil 4.4 : BOF yönteminin aşamaları. [17]



Şekil 4.5 : Yüksek fırından gelen pik demirin BOF'na dökülmesi [17].

4.2.2 Elektrik ark fırını (EAF)

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 ocağı 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 (Şekil 4.6) [21].



Şekil 4.6 : Üç elektrotlu elektrik ark fırını.

Demir çelik tesislerinde 1 ton sıvı çelik üretimi için EAF sistemine temel girdi ve çıktılar Çizelge 4.5'te sayısal olarak verilmiştir.

Çizelge 4.5 : EAF girdi ve çıktıları.

Girdiler			Çıktılar		
Hurda	kg/t	1080 - 1130	Sıvı metal	kg/t	1000
Topl. Enerji	kWh/t	650 – 750	Cüruf	kg/t	100 - 150
Elektrik	kWh/t	345 - 490	Partiküller	kg/t	10 – 20
Oksijen	m ³ /t	24 - 47	Birincil tozlaşma	mg/m ³	3400 - 33900
Kireç	kg/t	30 - 80	İkincil tozlaşma	mg/m ³	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	
Su	Kısa devre döngü		Gürültü	dB (A)	125 – 139 (< 70)

Şekil 4.7'de elektrik ark fırınlı bir fabrika görülmektedir. Elektrik ark fırınının yer aldığı ikiz gövdeli bina, toz, gaz ve duman emisyonlarını azaltmak için tamamen izole edilmiştir [21].



Şekil 4.7 : Elektrik ark fırınlı fabrika.

A.B.D.'deki çelik üretiminin %30'u bu yöntemle yapılır. Bu fırında da pik demir kullanılabilir, ancak burada daha çok hurda demir-çelik kullanılmaktadır. Birkaç farklı EAF vardır. Doğrudan ark tipi en yaygın olanıdır. Bu fırınların üst kapağı hareketli olup yükleme burada yapılır, boşaltma ise fırının eğilmesi ile gerçekleştirilir. Fırına hurda demir-çelik ile alaşım elementleri ve kireçtaşı yüklenir. Bunlar elektrik arkı ile ısıtılır. Ark elektrotlar ve metal arasında oluşur. Tam ergime 2 saat sürer, tüm işlem ise 4 saatte tamamlanır. Bu fırınların kapasitesi 25-100 ton arasındadır. Bu yöntemle, BOF yöntemine kıyasla daha kaliteli çelik üretilir, fakat işlem daha pahalıdır [17].

4.3 Cüruf Oluşumu

Cüruflar, çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından biridir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri tesisin ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

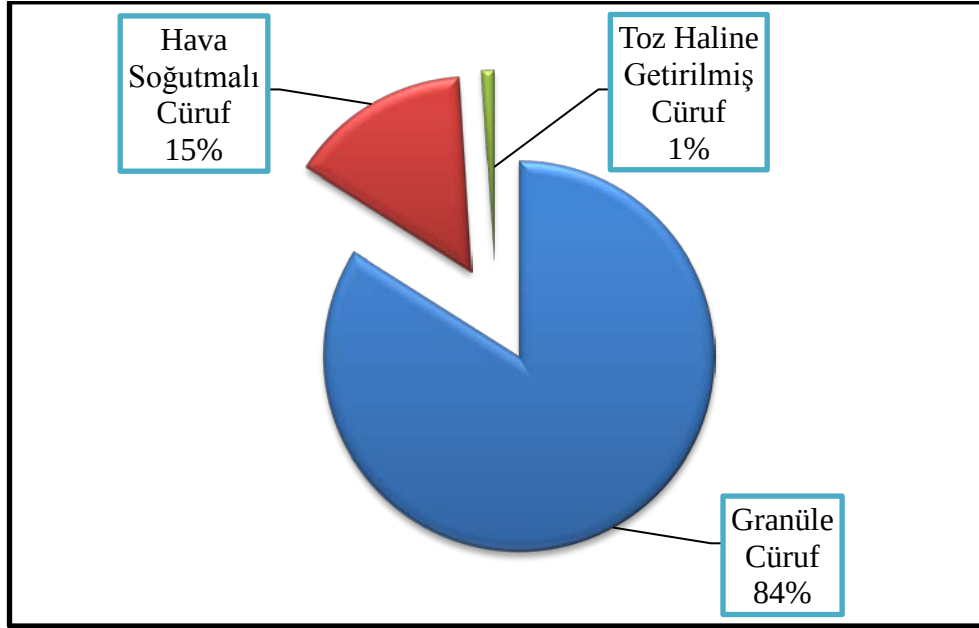
4.3.1 Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın içine yakıt olarak kok konulup, demir cevherine kireç taşı veya dolomit ilavesiyle ham demir üretilmektedir. Bu üretim sırasında oluşan maden dışı yan ürün yüksek fırın cürufudur.

Yüksek fırın cürufları (YFC) soğutulma yöntemlerine göre dört gruba ayrılır.

- Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu: Yüksek fırından çıkan sıvı cürufun çukurlara dökülüp, uygun koşullar altında soğutulmasıyla elde edilir. Kristal yapıda, sert, büyük kütleler biçiminde sertleşir; daha küçük parçalar elde edebilmek için de kırma ve eleme işlemleri yapılmaktadır. Havada soğutulmuş YFC'nin kırılıp, elenmesiyle pürüzlü yüzeyle malzeme elde edilir. Böylece, malzeme yüksek adezyon ve sürtünme özelliklerine sahip olmaktadır. Ayrıca su emme yüzdesi ve dona karşı direnci de yüksektir.
- Genleşmiş (Köpüklendirilmiş) Cüruf: Yüksek fırından çıkan dökme cürufun çukura boşaltılıp, kontrollü miktarlarda su, hava ve buhar ilavesiyle soğutularak, sertleştirilmesiyle elde edilir. Bunlar, havada soğutulmuş cüruftan daha yüksek poroziteye ve daha düşük birim hacim ağırlığa (8 kN/m^3) sahiptir. Genleşmiş cüruf, hafif agrega malzemesidir.
- Toz Haline Getirilmiş Cüruf: Ergimiş cürufun, santrifüj (merkezkaç) kasnağında su ve hava ile bastırılarak soğutulup, parçalanmasıyla oluşur. Büyük bir kısmı camlaşır. Bu cürufun tane boyutları 0–30 mm arasında çeşitlilik gösterir.
- Granüle Cüruf: Dökme cürufa yüksek basınçlı su püskürtülerek, hızlı soğutmak suretiyle elde edilir. Cüruf, kristalleşmeden camsı bir malzeme olarak sertleşmektedir. Bu işlem sonucunda kum boyutunda, camsı, klinkere benzeyen bir malzeme oluşmaktadır. Parçalanıp, öğütülmesiyle çok ince çimento boyutunda, puzzolanik tanecikler oluşmaktadır. Bu tanecikler kimyasal bakımdan portland çimentosu klinkerine benzemektedir, yalnızca içindeki CaO miktarı daha azdır [9].

2008 yılı verilerine göre Avrupa'da ortaya çıkan yüksek fırın cürufunun miktarı yaklaşık 28 milyon tondur. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, bu cürufların %84'ü granüle cüruf, %15'i hava soğutmalı cüruf ve %1'i toz haline getirilmiş cüruflardır.



Şekil 4.8 : Avrupa'da yüksek fırın cürufu üretimi [22].

4.3.2 Çelikhane cürufu

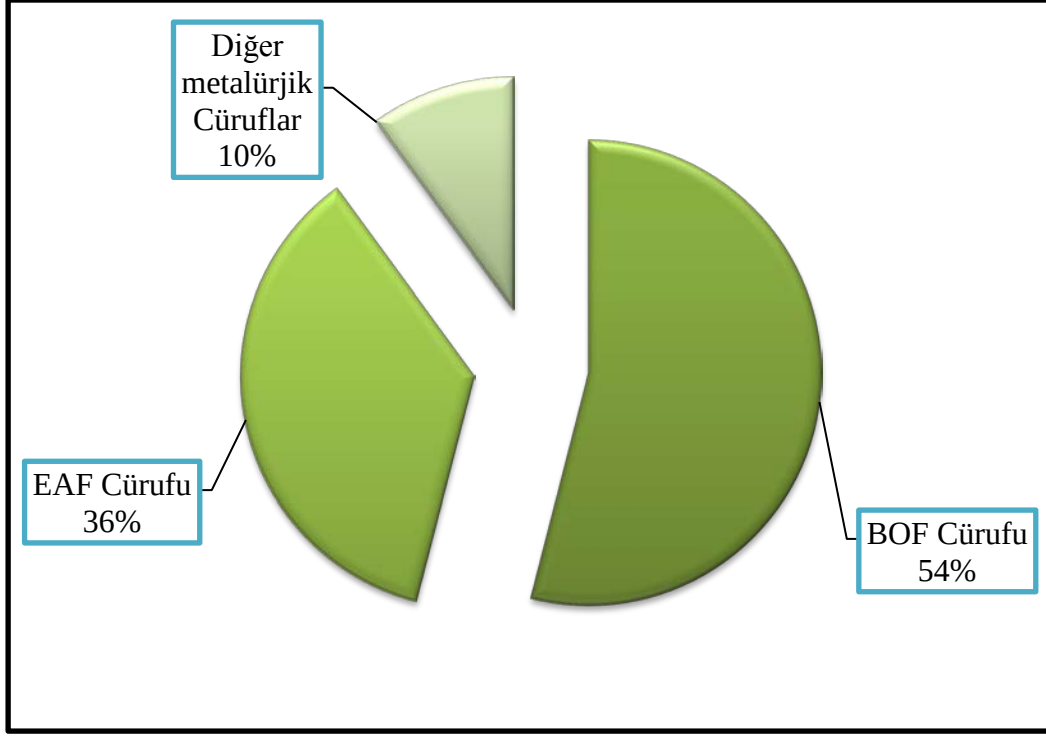
Demir çelik fabrikaları yan ürünlerinden olan çelikhane cürufu, çelik üretim işleminde, ergimiş demirdeki istenmeyen elementlerden arındırılması aşamasında elde edilmektedir [18].

Çelik cürufu, tesisin üretim yöntemine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar;

- 1- Açık ocak (Open hearth) cürufu
- 2- Temel oksijen (Basic oxygen) fırını cürufu
- 3- Elektrik-ark fırını (EAF) cürufu [23].

Çelikhane cürufu, çelik üretimi esnasında çelik içerisindeki istenmeyen elementlerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu kompleks bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan ürünler olarak tanımlanmaktadır. Cüruflar farklı metalurjik işlemlerin ürünleri olabilmektedir. Bazı oksijen fırınlarında yapılan çelik üretiminde açığa çıkan cüruflar BOF cürufları, elektrikli ark fırınlarında (EAF) yapılan üretimde açığa çıkan cüruflar ise EAF cürufları olarak adlandırılmaktadır [19].

Avrupa'da ortaya çıkan çelik cürufunun miktarı 2008 yılı verilerine göre yaklaşık 17,5 milyon tondur. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, bu cürufların %54'ü temel-oksijen fırını (BOF) cürufu, %36'sı elektrik ark fırını (EAF) cürufu ve %10'u diğer metalürjik cüruflardır [22].



Şekil 4.9 : Avrupa'da çelik cürufu üretimi [22].

4.3.2.1 Bazik oksijen fırını (BOF) cürufu

Bazik oksijen işlemlerinde sıcak maden, hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) konvertöre şarj edilir. Daha sonra konvertör içine daldırılan bir lans aracılığı ile yüksek basınçta oksijen üflenir. Üflenen oksijen şarjdaki elementlerle birleşir. Bu elementler karbon (CO gazı olarak), silisyum (Si), manganez (Mn), fosfor (P) ve bir miktar demir (Fe)'dir (Sıvı oksitler halinde). Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar kireç ve dolomitik kireç ile birleşerek cürufu oluşturur. İşlem bitiminde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100-1500 °C'de özel cüruf potalarına boşaltılarak taşınmakta ve stok sahalarında soğumaya bırakılmaktadır. 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 100-150 kg (%10-15) cüruf oluşmaktadır [24].

Bazik oksijen işleminde; ergimiş haldeki pik demir ve hurda metal kullanılır. Fırın içine yüksek basınçta, safa yakın derecede oksijen gazı verilerek yaklaşık 1700 °C'lik bir sıcaklığa erişilir. Bu sıcaklık hurda metalin ergimesine ve karbonun

uzaklaşmasına sebep olur. Yanma sonrası açığa çıkan istenmeyen elementler fırına ilave edilen ergiticiler (kireç veya dolomit) ile tepkimeye girerek cüruf fazını oluşturur. Cürufu meydana getiren bu elementler; karbon (karbon monoksit formunda), silisyum (Si), manganez (Mn), fosfor (P) ve az miktarda sıvı halde demir oksitlerden oluşmaktadır.

Bazık oksijen fırınlarının temel amacı karbon giderimidir. Fırına sıvı pik ile birlikte hem tonaj artırımını hem de soğutucu amaçlı olarak hurda da şarj edilir. Cüruf yapıcılar ilave edilerek saf oksijen üflenir. Üflenilen oksijen ile karbon ve diğer elementlerin giderimi sağlanır. Fırında oluşan reaksiyonlar sonucunda oksitlerden meydana gelen cüruf oluşur. Oluşan cüruf içinde temel oksitler olarak CaO, SiO₂, MnO, P₂O₅, FeO ve MgO bulunur. MgO ve CaO dışındaki bütün oksitler sıvı pik ve hurda kaynaklı olarak oluşur. CaO'in kaynağı cüruf yapıcılar ve MgO'nun kaynağı ise, ilave edilen cüruf yapıcılar ya da fırının magnezit karbon olan çalışma astarıdır [4].

4.3.2.2 Elektrik ark fırını (EAF) cürufu

Hurda metal ve kireçle doldurulan fırın içine fırın kapağında yer alan elektrotlar indirilir. Elektrotlardan geçen elektrik akımı, hurda metal ve elektrotlar arasında ark yaparak hurda metalin ergimesi için gereken yüksek ısıyı ortaya çıkarır. Hurda metaldeki karbon, silisyum, manganez gibi elementleri oksitlemek için sisteme oksijen verilir. Oksit formundaki bu safsızlıklar kireçle birleşerek cürufu meydana getirmektedir.

Hurda eritimi ve çelik üretimi sırasında iki önemli atık oluşmaktadır. Bunlar elektrik ark fırını tozları (EAF-T) ve cüruftur. Genel olarak, bir ton çelik üretiminde yaklaşık 14 kg EAF-T ve 100 kg cüruf açığa çıkmaktadır [25].

Elektrik ark fırınında ana hammadde olarak kullanılan demir hurdası, çelikhaneden (örnek: fireler), çelik kullanıcılarından (örnek: otomotiv üreticileri) ve nihai tüketicilerden (örnek: kullanım ömrünü dolduran malzemeler) temin edilmektedir.

EAF cürufu, hurdadan çelik üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) şarj edilmekte ve ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sıvı çelik doğrudan doğruya kullanım için yeterli kalitede değildir. Bu nedenle, sıvı çelik potaya alınarak ilave işlemlere tabi tutulur. Sıvı çelikten oksidasyon işlemi ile istenmeyen elementler oksit formunda

uzaklaştırılır. Bu elementler, karbon (CO gazı olarak), silisyum, manganez ve fosfordur. Bunlarla beraber bir miktar da demir oksitlenir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar, kireç ve dolomitik kirecin kalsinasyonu ile oluşan kalsiyumoksit ile birleşerek ergimiş cürufu oluşturur. İşlem bitiminde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100 - 1500 °C'de özel cüruf potalarına boşaltılarak stok sahalarına taşınır ve soğumaya terkedilir. 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 100 - 150 kg (% 10 - 15) cüruf oluşmaktadır.

Kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen oksitlerden gaz halinde olanlar, banyodan uzaklaşarak gaz toplama tanklarında toplanmaktadır. Sıvı halde olanlar ise, ilave edilen katkı malzemeleri ile birleşerek cürufu oluşturur. Kısaca, cüruf, çelik üretimi esnasında çelik içindeki elementlerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu kompleks bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan üründür. Cürufun yaklaşık yarısı kireç (CaO) olup, geri kalan kısmı sıcak metal ve hurdadaki elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir. Ancak, bu bileşimin büyük çoğunluğu diğer metal oksitler ile stabil ve kararlı bileşik oluşturarak çevresel açıdan stabil yapıdadır. Cüruf genel olarak tehlikesiz atıktır ve inert atıklar sınıfına girmektedir. Fiziksel olarak koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptir.

5. CÜRUFLARIN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından biridir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri tesisin ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Demir çelik fabrikaları yan ürünlerinden olan çelikhane cürufu, çelik üretim işleminde, ergimiş haldeki demirin istenmeyen elementlerden arındırılması aşamasında elde edilmektedir. Çelikhane cüruflarının farklı endüstriyel tesislerde kullanımı için çeşitli araştırmalar yürütülmektedir. Çelikhane cürufunun farklı üretim alanlarında hammadde olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesindeki en önemli faktörlerden biri işlemin ekonomik katkılarıdır. Günümüzde, cürufların büyük bir kısmı, özelliklerinden tam anlamıyla yararlanılmadan kullanılmakta veya kullanılmadan atılmaktadır [19].

Son yıllarda demir çelik fabrikaları, çevre koruma ve geri dönüşüm konusunda çeşitli programlar üzerine yoğunlaşarak, kullanılmayan atık malzeme oranını sıfıra indirmeye çalışmaktadır. Bu programlar; tüm çelik üretim işlemi aşamalarını, yan ürün oluşumunu minimuma indirmeyi, düşük maliyetle üretim yapmayı, taşıma ve işlem teknolojilerini kapsamaktadır. Kaynakların etkin kullanımı, ekonomi ve çevre koruma faktörleri dikkate alındığında, çelik fabrikalarından çıkan çeşitli türdeki cürufların, toz ve çamurların çok iyi bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Çelik üretiminde ortaya çıkan fazla miktardaki yan ürünler, dünyada birçok ülkede yasalarla denetlenmektedir. Demir çelik fabrikaları kendi atıklarını ya da yan ürünlerini çevresel faktörleri de dikkate alarak kullanmanın veya yok etmenin yollarını aramaktadır. Dünyadaki eğilim, çelik üretiminde yan ürünleri mümkün olduğunca kullanmak ve yasalarla yan ürün kullanımını desteklemektir. Ülkemizde de demir çelik endüstrisinden gelen yan ürünlerin geri kazanımı ve atıkların çevreyle uyumlu bir şekilde yok edilebilmesi konusunda çalışmalar yapılarak, üretim yapan şirketler ve araştırmacılar birlikte çalışmakta, geliştirilen/geliştirilecek atık/yan ürün değerlendirme işlemleri devlet tarafından yasalarla desteklenmektedir [23].

5.1 Cürufların Fiziksel Özellikleri

Yüksek fırın cüruflarının ve çelikhane cüruflarının özgül ağırlıkları, birim hacim ağırlıkları ve su emme yüzdeleri, (ASTM C 127) çeşitlerine göre Çizelge 5.1'de verilmiştir [26].

Çizelge 5.1 : Cürufların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Hava Soğutmalı	Genleşmiş	Toz Haline Getirilmiş	Çelikhane Cürufu
Özgül Ağırlık (gr/cm ³) (kN/m ³)	2,0–2,5 (20-25)	-	-	3,2–3,6 (32-36)
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	11,2–13,6	8,0–10,4	8,4	16,0–19,2
Su Emme Yüzdesi (%)	1–6	-	-	< 3

Çelik cürufunun özellikleri, demir cürufundan biraz daha farklıdır. Çelik cürufu, fiziksel özellikleri bakımından Ferrochrom cüruflarına benzer. Çelik cürufunun birim ağırlığı demir cürufuna göre daha fazladır. Daha sert, dayanıklı ve aşınma direnci yüksek bir malzemedir. Su emme yüzdesi daha düşüktür.

Fiziksel olarak çelik cürufları koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptir. Yüksek fırın cürufuna kıyasla çok sert ve dayanıklı olup, özgül ağırlıkları ise %20-25 daha büyüktür [24].

Çelik cürufu, yüksek cilalanma direnci ve uzun vadede yüksek aşınma direnci göstermesi nedeniyle, bitümlü kaplama tabakalarında kullanıma uygun bir malzemedir. Karışım içinde sert ve dayanıklı bir agrega görevi yapar. Ancak, uygulamada çoğunlukla temel tabakalarında kullanılmaktadır.

EAF cürufunun görüntüsü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 : EAF cürufunun görüntüsü

Erdemir cüruflarına ait fiziksel özellikler de Çizelge 5.2'de görülmektedir [5].

Çizelge 5.2 : Erdemir cüruflarının fiziksel özellikleri.

Özellikler	Granüle Cüruf	Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu (Kaba)	Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu (İnce)	Çelikhane Cürufu (Kaba)	Çelikhane Cürufu (İnce)
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,51	2,791	2,777	3,794	3,882
Birim hacim Ağırlık (kN/m ³)	9,8	13	-	17,95	17,95
Su Emme Yüzdesi (%)	-	4,71	-	0,8	-

Erdemir çelik cüruflarına yapılan element analizleri sonucunda, numuneler fiziksel görünümlerine göre masif ve süngerimsi cüruf olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Süngerimsi cürufun daha fazla kalsiyum ve daha az demir içerdiği anlaşılmıştır. Cürufun çok miktarda su ile kısa zamanda soğutulması sonucu ortaya çıktığı düşünülen süngerimsi cüruf kırılğan ve amorf bir yapı sergilemektedir. Masif cüruf

ise, cürufun yavaş yavaş, uzun sürede soğutulması sonucunda yeniden kristalleşmesiyle oluşmaktadır ve masif yapı iri taneler içermektedir. Süngerimsi cüruf miktarı toplam cürufun %2,31'i olup, cürufun bitümlü sıcak karışımlarda kullanılmasında engel oluşturmamaktadır [24].

Cürufların dona karşı gösterdiği direnç oldukça fazladır. Çizelge 5.3'de cüruflara ait mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Cürufların mekanik özellikleri [27].

Özellikler	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	35–45	20–25
Sodyum Sülfat Sağlamlığı (donma kaybı) (%)	12	<12
Sertlik	5–6	6–7
Sürtünme Açısı	40°–45°	40°-50°
CBR (%)	>250	>200

Çizelge 5.4'de Erdemir cürufuna ait mekanik özellikler görülmektedir. Bulunan değerler, şartname limitlerine uymaktadır [5].

Çizelge 5.4 : Erdemir cürufunun mekanik özellikleri [5].

Özellikler	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu	Şartname Limitleri	Standartlar
Soyulma Direnci (%)	30–35	90–95	Min 50	Nicholson yöntemi
Cilalanma (%)	58	53	Min 50	TS EN 1097-8
Yassılık İndeksi (%)	11,53	-	Maks. 30	BS 812
Aşınma Kaybı (%)	32	13,83	Maks. 35	TS 3694

ASA'ya göre demir-çelik cüruflarının tipik özellikleri ise Çizelge 5.5'de verilmiştir [28].

Çizelge 5.5 : Havada soğutulmuş YFC ve çelik cürufunun tipik fiziksel özellikleri.

Agrega, Fiziksel Özellikleri	YFC	Çelik Cürufu		Deney Yöntemi
	Havada Soğutulmuş Cüruf	BOF Cürufu	EAF Cürufu	
Birim hacim ağırlık(kg/m ³)	2400-2500	3300	3300	T209
Yığın yoğunluk (kg/m ³)	Gevşek	1200-1300	1700	T211
	Sıkı	1300-1400	1900	T212
Kuru dayanım (KN)	85-100	250	275	T215
Yaş dayanım (KN)	65-90	230	240	
Los Angeles aşınma %'si	37-43	13-15	13-15	T204
Cilalanma değeri	50	58	62	T233
Yol temeli fiziksel özelliği				
Maks. kuru birim ağırlık (20 mm standart kompaksiyon ile) (kg/m ³)	2050-2150	2300-2400	2300-2400	T111

5.2 Cürufların Kimyasal Özellikleri

Çelikhane cüruflarının yaklaşık yarısı kireç (CaO) olup, geri kalanı sıcak maden ve hurdadaki elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir. Bunlar, yaklaşık olarak %15- 20 oranında FeO içermektedir [24].

Çelik cürufunun nem ile karşılaşınca genleşme eğilimi vardır. Genleşme kalsiyum ve magnezyum oksitlerin hidratasyonu ile meydana gelmektedir. Dolayısıyla, kaplama tabakası dışındaki kullanımı için su içinde bir süre bekletilmesi gerekmektedir.

Cürufun kimyasal yapısı, demir cevherinin yapısına ve yüksek fırın sıcaklıklarındaki farklılıklara bağlı olarak değişmektedir. Cürufu oluşturan kireç, silis ve alüminyum yüzde oranları çok değişiklik göstermektedir. Cüruf, puzolanik bir yapıya sahiptir. Kimyasal bakımdan portland çimentosu klinkerine benzemekte, fakat daha az CaO içermektedir. Cürufların kimyasal bileşimi Çizelge 5.6'da görülmektedir [10].

Yüksek fırın cürufunda Ca ve Mg oksitler silikat ve alümina silikat minerallerini oluştururken, aynı oksitler çelikhane cürufunda tam olarak bileşik yapmazlar. Sönmemiş kirecin hızlı bir şekilde hidrate olmasıyla hacimsel genleşme oluşur. Magnezyum oksit ise, daha yavaş hidrate olduğun için hacimsel genleşmenin

oluşması uzun yıllar sürebilir. Ca ve Mg oksitler hidrate olduklarında %10'dan fazla hacimce genleşmeye sebep olurlar. Bu yüzden, çelikhane cürufu kullanılmadan önce uzun süreli kontroller yapıp hacim değişimleri belirlenmelidir. Çelik cürufları asfalt betonu karışımlarda, temel ve alttemel tabakalarında, karayolu tabanında, demiryolu balastında agrega olarak kullanılabilir. Genleşme özelliği, bu alanlardaki kullanımında göz ardı edilebilmekte veya uygun yaşlandırma ile kontrol edilebilmektedir. Çelikhane cüruflarının yol yapımında kullanımında, yaşlandırma yöntemi olarak Avrupa standardı olan buhar testi uygulanmaktadır. Cüruflar silindirik kaplara doldurularak 24-168 saat boyunca buharda tutulmaktadır [24].

Çizelge 5.6 : Cürufların kimyasal bileşimleri.

Kimyasal Bileşikler	Yüksek Fırın Cürufu (%)	Çelikhane Cürufu (%)
CaO	30–50	40–52
SiO ₂	30 – 40	10–19
Al ₂ O ₃	8–18	1–3
MgO	0–15	5–10
FeO (FeO veya Fe ₂ O ₃)	0–1	10–40
MnO	0–2	5–8
S	0–2	< 0.1
P ₂ O ₅	-	0.5–1
Serbest Kireç	-	1–10

5.3 Cürufların Kullanım Alanları

İşlem atıklarının veya yan ürünlerinin farklı sektörlerde hammadde kaynağı olarak kullanımı, atık bertarafı; maliyet azaltımı, etkin kaynak kullanımı ve benzeri nedenlerle, günümüz teknolojilerinin önemli unsurlarından birini oluşturmaktadır. Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi kavramı, çevresel ve ekonomik katkıları nedeniyle son yıllardaki en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Özellikle Kyoto Protokolü'nü takiben ülkelerin CO₂ emisyon değerlerini 2008-2012 yılları arasında 1990'daki seviyenin % 5 altındaki değerlere düşürmek zorunda olmaları, atık hammadde kaynaklarına olan ilgiyi daha da arttırmaktadır. Mevcut teknolojiyle, entegre tesisler ton ham çelik üretimi başına 1,8-2,0 ton CO₂, ark ocaklı tesisler ise, 0,2-0,4 ton CO₂ salım yapmaktadırlar [29].

Çelikhane cürufu çok yoğun ve sert bir malzemedir. Kolaylıkla uygun tane boyutuna kırılabilir ve 200 kN civarında yaş mukavemet değeri ile mükemmel bir agregadır. Düşük Los Angeles aşınma değerine ve yüksek kayma kararlılığına sahiptir. Bu cüruftan üretilen agregalar bitüm ile kuvvetli bir şekilde bağlanabilmektedir. İçermiş olduğu az miktardaki kireç nedeniyle mükemmel soyulma dayanımlarına sahiptir. Doğal agregalarınkine kıyasla yüksek kayma (patinaj) dirençleri ve dayanıklı yapısı, çok uygun özellikte asfalt agregası olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Tekerlek izi direncinin yüksek olması, çelik cürufunun yoğun trafiğin olduğu kavşaklarda ve durma bölgelerinde kullanımının artmasına neden olmuştur.

Çelikhane cürufu kullanarak asfalt üretilmesinin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Stabilitelerinin yüksek olmasından dolayı bazı durumlarda daha ince asfalt döşenmesine imkan sağlamaktadır.
- Kararlılıkları, sertlikleri ve iyi bağlanma özellikleri kaliteli asfalt üretilmesini mümkün kılmaktadır.
- Cüruf agregalarının köşeli bir yapıda olması ve böylece tanelerin birbirlerine daha sıkı kenetlenebilmeleri cürufu asfaltların tekerlek izi oluşum dirençlerini artırmaktadır.
- Yüksek kayma (patinaj) direncine sahip olmaları nedeniyle yollarda güvenlik artırmaktadır.
- Cüruf agregalarının bitüm ile kuvvetli bağ oluşturabilme özelliği sebebiyle soyulma direnci yüksek asfalt üretilmektedir.
- Cüruf tanelerinin dayanımlarının yüksek olması ve tanelerin birbirleri ile çok iyi kenetlenebilmesi, yüksek sıcaklık koşullarında bile asfaltın kalıcı deformasyon direncini artırmaktadır.
- Bunlar, bünyelerinde daha uzun süre ile ısıyı tutabilmektedir. Bu özellikleri, asfalt döşeme ve sıkıştırma işlemleri için avantaj oluşturmaktadır. Çünkü sıcak asfaltın döşenmesi ve sıkıştırılması soğuk asfalta nazaran çok daha kolaydır.

Çelikhane cüruflarının asfalt agregası olarak kullanılmasının bu avantajlarının yanı sıra, kullanımlarını sınırlayan bazı dezavantajlarının olduğu da belirlenmiştir. Bunlar, özgül ağırlıklarının yüksek olması sebebiyle nakliye maliyetlerinin klasik

agregalarınkinden yaklaşık % 20 daha pahalı olması ve serbest kireç içerdikleri için potansiyel hacimsel genleşme problemlerinin olmasıdır. Ancak, çok uygun fiziksel özellikleri sebebiyle daha kaliteli ve uzun ömürlü asfalt üretimine imkan sağlamaları, taşıma maliyetlerindeki artışı kompanse edebilmektedir. Potansiyel hacimsel genleşme problemleri ise cürufta bulunan kirecin hidratasyonu amacıyla uygun yaşlandırma işleminden geçirilmesiyle çözülebilmektedir. Yaşlandırma prosesi stok sahalarında cürufların atmosferik koşullarda bir süre bekletilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu süre genellikle 6 ay'dır. Ancak buharlı yaşlandırma işleminin daha kısa sürelerde oldukça etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kirecin hidratasyonu sonucu oluşan hacimsel genleşmenin asfalt uygulamalarında önemli bir problem teşkil etmeyeceği ileri sürülmektedir. Bunun nedeni cüruf agregalarının bitüme olan yüksek kimyasal ilgileri sebebiyle, bitümün cüruf yüzeyini kaplayarak suyun taneler arasına girmesini engellemesidir. Suyun etkisi azaldığından, hidratasyonun gerçekleşmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, asfalt düşük oranlarda oluşan genleşmeyi tolere edebilecek visko elastik bir malzemedir.

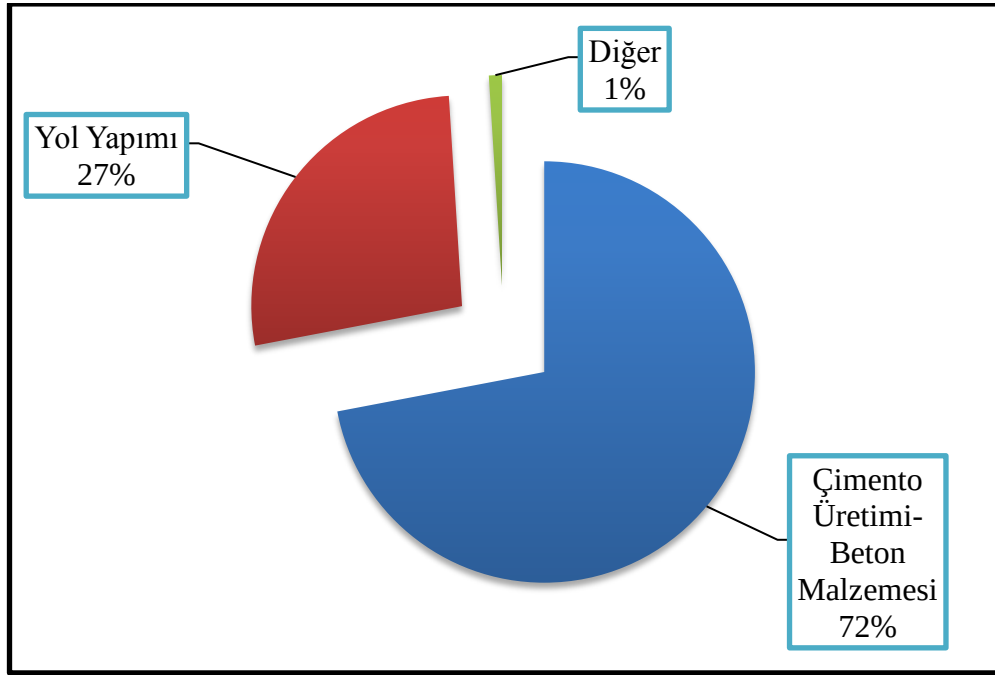
Dünyada çelikhane cüruflarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan birçok bilimsel araştırma mevcuttur. Bu araştırmalar sonucunda, çelikhane cüruflarının özellikle kara ve demir yollarında, çimento sanayiinde, tarımda ve cüruf yünü imalatında konvansiyel malzemelerin yerine kullanılabileceğinin teknik ve ekonomik açıdan mümkün olduğu vurgulanmıştır.

Kullanım alanları her bir ülke ve tesisin özel koşullarına göre değişebilmektedir. Örneğin, Çin'de çimento sektöründe, Japonya ve Avustralya'da karayollarında, Güney Kore'de sisteme geri döndürülerek yüksek fırın ve sinter işlemlerinde kullanılması şeklindedir. Avrupa'da ise, gübre olarak tarımda, toprak iyileştirilmesinde ve yüksek fırın işleminde kullanım alanı bulmaktadır. Hindistan'da kullanım miktarlarının en üst seviyelere çıkarılması için çalışmalar devam etmektedir. Mevcut durumda yüksek fırın ve sinter tesislerinde kullanılmakta, tren yollarında, karayollarında, arazilerin ıslah edilmesinde kullanımına ilişkin olumlu sonuçlar alınmış, çimento sektöründe kullanımının da ekonomik olduğu belirlenmiştir.

Çelik cürufunun, temel ve temel altı malzemesi, toprak set, dolgu, ana yol banketleri ve sıcak asfalt karışımları uygulamalarında agrega olarak kullanımı artık standart bir uygulama haline gelmiştir. Bu alanlarda kullanılmadan önce uygulama alanına ilişkin

özellikleri sağlaması amacıyla çelik cürufları kırılarak elenmelidir. Hidratasyonun sebep olduğu genleşmeyi önlemek amacıyla yaşlandırma işlemi uygulanmalıdır. Çelikhane cürufları, serbest kireç ve bazı nadir elementler içeriği sebebiyle toprağın koşullandırılmasında da uygulama alanı bulmaktadır [24].

Avrupa genelinde yüksek fırın cüruflarının kullanım alanlarının dağılımı, 2008 verilerine göre Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu dağılıma göre, yüksek fırın cüruflarının % 72'si çimento üretimi ve beton malzemesi olarak kullanılırken, %27'si ise yol yapımlarında kullanılmaktadır.



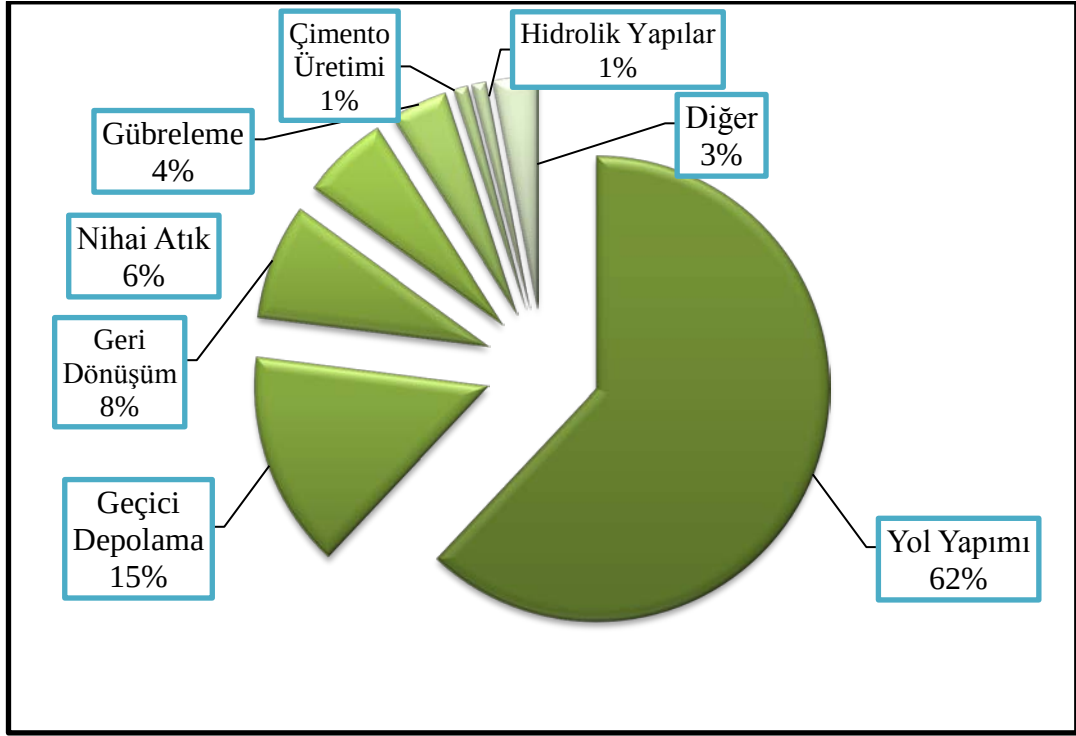
Şekil 5.2 : Avrupa' da yüksek fırın cürufu kullanımı (2008) [22].

Cürüfların kullanım alanı özet tablosu ise Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Demir ve çelik cürüflarının kullanım alanı özet tablosu [28].

Cüruf Kaynağı	Yaygın Bilimsel Adı	Yol İnşaatında Kullanımı
Yüksek fırın cürufu (YFC)	Havada soğutulmuş cüruf	Temel
		Alttemel
		Beton agregası
		Filtre agregası
		İnşaat dolgusu
	Granüle cüruf	Gabyon sepetleri
		İnşaat kumu
		Stabilizasyon aracı
		Çakıl balastı
		Yol alttemeli
	Genleştirilmiş cüruf	İnşaat dolgusu
		Çimento üretimi
		İnşaat betonu ve duvarcılıkta
		hafif agrega
		Kayma direnci yüksek agrega
Pelletize edilmiş cüruf	Çimento üretimi	
	Beton ve duvar işlerinde	
	hafif agrega	
Çelik cürufu	Temel oksijen fırını (BOF) cürufu	Sealing (örtü) agregası
		Asfalt agregası
		Yol temel ve alttemeli
		İnşaat dolgusu
		Taban drenaj elemanı
		Çakıl balastı
		Kayma direnci yüksek agrega
	Elektrik-ark fırını (EAF) cürufu	Sealing (örtü) agregası
		Asfalt agregası
		Yol temel ve alttemeli
		İnşaat dolgusu
		Taban drenaj elemanı
		Çakıl balastı
		Kayma direnci yüksek agrega

Avrupa genelinde çelikhane cüruflarının kullanım alanlarının dağılımı ise, 2008 verilerine göre, Şekil 5.3'te verilmiştir. Çelik cüruflarının %62'lik kısmı yol yapım malzemesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.3 : Avrupa'da çelikhane cürufu kullanımı [22].

Çelik cürufu, toprağın asitlik oranını indirmek, fiziksel özelliklerini düzenlemek ve temel bitki besleyicilerinin kaybını önlemek için zirai amaçla da kullanılabilir. Cüruf, bitki büyümesi için gerekli olan manganez ve demir gibi elementleri içermektedir. İçerdiği CaO ve MgO ile toprağın pH'sını nötralize etmektedir [5].

A.B.D.'de, karayollarında kullanılan atık malzemeler üzerine yapılan bir anket çalışması sonucunda, 44 karayolu yapım şirketinden 16'sının cürufu karayollarında yüksek miktarlarda kullandığı saptanmıştır. Kullanan şirketler, geleneksel malzemelere göre cürufların daha ekonomik, çevre yönünden kabul edilebilir düzeyde ve performans bakımından şartname limitlerini sağladığını belirtmişlerdir.

Cüruflar, karayollarında bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak, granüler temel ve alttemel tabakalarında ve taban zemini stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Beton yollarda da portland çimento betonuna katkı malzemesi olarak granüler yüksek fırın cürufu kullanılabilir.

Çelik cüruflarıyla oluşturulan bitümlü karışımlar yüksek stabiliteye sahip olmaktadır. Cüruflar, bitümlü karışımların soyulmaya ve neme karşı direnç özelliklerini, yorulma ömrünü arttırmaktadır. Cüruflarla, yüksek kararlı yapıya sahip ve tekerlek izine dirençli yüzeyler elde edilmektedir.

Granüler yüksek fırın cürufları optimum tane dağılımına sahiptir. Bu sebeple, kolaylıkla bir işleme gerek kalmadan kullanılabilirler. Toplam agrega miktarının %10'undan fazla granüle cüruf içeren karışımların teknik performans değerleri, şartname limitlerini sağlayamamaktadır.

Çelik cürufunun yüksek birim hacim ağırlık değeri, cürufun taşıma fiyatını arttırmaktadır. Çelik cüruflarında hacimsel genleşme de görülmektedir. Agregaların potansiyel genleşmelerini belirleyebilmek için standart hacimsel genleşme test metodu (ASTM D-4792-88) uygulanmaktadır. Hacimsel genleşme testi, Erdemir'den temin edilen 19-40 mm boyutlar arasından seçilmiş orijinal çelikhane cüruflarına uygulanmış; yedi günlük deney sonucunda, karışım agregalarının genleşme miktarları % 0,472-1,594 arasında bulunmuştur. 25-40 mm arasındaki çelikhane cüruflarının genleşme miktarları ise, % 1,404-1,595 arasındadır. Farklı boyutlardaki cüruf numunelerine hızlı yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. 5 mm altındaki cüruf numunelerinde (tane boyutu küçük olduğu için) serbest kalsiyumun hidratasyonu daha çabuk başlamıştır. Diğer boyutlardaki numunelerde ise, boyutun büyük olması sebebiyle hidratasyon gerçekleşmediği gözlenmiştir [24].

Eğer çelikhane cürufları hidratasyonun olabileceği alanlarda kullanılacaksa yaşlandırma işleminin gerçekleştirilmesi için yağmurlama süresinin ve miktarının daha uzun tutulması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda, bitümlü karışımda kullanılacak çelikhane cürufunun bitümlü temel ve binder tabakalarında yaşlandırma yapılmadan kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Cüruf bu tabakalarda kullanıldığında, atmosferle doğrudan doğruya temas etmeyecek ve hidratasyon reaksiyonu uzun sürecektir. Cürufli karışımlardaki su ve don etkileri üzerine yapılan araştırmalarda, su etkisinin stabiliteyi önemsenmeyecek miktarda azalttığı belirlenmiştir. Su etkisi ile meydana gelebilecek hacimsel genleşme de küçük değerlerde kalmaktadır.

Cürufun, bir diğer olumsuz özelliği de yüzey yapısıdır. Köşeli olması ve yüksek su emme özellikleri bitümlü karışımlarda bağlayıcı ihtiyacını arttırmaktadır.

Temel ve alttemel yapımında yüksek fırın cürufuna ilave olarak çelikhane cürufu kullanılmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufunu aktif hale getirmek için çelik cürufu kireç kaynağı olarak kullanılabilir. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun, kendine has bir çimentolama özelliği mevcuttur. Bu sebeple, bu sıkıştırılmış malzeme, temel veya alttemel tabakası olarak kullanıldığında, zamanla yolun mukavemetini arttırmaktadır. Yapılan araştırmalarda, 17 aylık bir sürede bu mukavemetin 14 MPa'a kadar çıktığı gözlenmiştir.

Granüle cüruf kimyasal bağlayıcı ile taşıma gücü düşük taban zeminlerinin stabilizasyonunda da kullanılmaktadır. Çelikhane cürufu taban zemini malzemesi olarak kullanıldığında, zemin yüksek taşıma kapasitesine sahip olmaktadır. Çelikhane cürufları temel, alttemel veya taban zemininde agrega olarak uzun süreli kullanımlarında bile parçalanmadan kalabilmektedir [30].

Çelikhane cürufları, kullanımdan önce ya da tabana serildikten sonra stabilize edilirse, hacimsel kararsızlıkları azalmaktadır. Çelikhane cürufları granüle cürufla karıştırılırsa taban zemininde daha üstün fiziksel özellikler göstermektedir.

Taban zemininde dolgu malzemesi olarak granüle cüruf, çelik cürufu ve uçucu külün oluşturduğu karışımın kullanılmasıyla üstün performans değerleri gözlenmektedir.

6. MALZEME VE YÖNTEM

6.1 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan EAF cürufu, doğal agrega ve bitüm ile ilgili bilgiler verilmiştir.

6.1.1 EAF cürufu

Bu çalışmada Kocaeli'de bulunan Çolakoğlu tesislerinden alınan EAF cürufu kullanılmıştır. Çizelge 6.1'de bu cüruflara uygulanan bazı deneyler ile saptanan fiziksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca, aşınma tabakası için şartname değerleri de verilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 6.1 : EAF cürufu özellikleri ve şartname değerleri.

Deneyle	Şartname Değerleri	Sonuçlar	Deneyle Standardı
Filler Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		3,2	
0,075mm'den Geçen Malzeme (%):		1	
İnce Agrega Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		3,72	
Kaba Agrega Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		3,7	
İnce Agrega Su Absorbsiyonu (%):		3,75	
Kaba Agrega Su Absorbsiyonu (%): maks.	2	3,69	TS 3526 (ASTMC-127)
Yassılık İndeksi (%): maks.	30	8	BS 812
Los Angeles Aşınma Kaybı (%): maks.	30	21	TS 3694 (ASTMC-131)
İnce Malzeme Organik Madde İçeriği (%):	Yok	Yok	TS 3673 (AASHTO T - 194)
Kaba Malzeme Organik Madde İçeriği (%):		Yok	
Cilalanma Değeri: min.	50	66,4	TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti (DOP'lu)(%): min.		90-100	
Soyulma Mukavemeti (DOP'suz) (%): min.	50	60-70	EK-A

6.1.2 Doğal agregat

Çalışmada, doğal agregat olarak Ömerli Alyans Taş Ocağı'ndan temin edilen agregat kullanılmıştır. Çizelge 6.2'de doğal agregatlara uygulanan bazı deneyler ile saptanan fiziksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca aşınma tabakası için şartname değerleri de verilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 6.2 : Doğal agregatın özellikleri ve şartname değerleri.

Deneyler	Şartname Değerleri	Sonuçlar	Deney Standardı
Filler Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		2,67	
0,075mm'den Geçen Malzeme (%):			
İnce Agregat Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		2,85	
Kaba Agregat Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³):		2,85	
İnce Agregat Su Absorpsiyonu (%):		0,44	
Kaba Agregat Su Absorpsiyonu (%): maks.	2	0,28	TS 3526 (ASTMC-127)
Yassılık İndeksi (%): maks.	30		BS 812
Los Angeles Aşınma Kaybı (%): maks.	30	19,28	TS 3694 (ASTMC-131)
İnce Malzeme Organik Madde İçeriği (%):	Yok	Yok	TS 3673 (AASHTO T - 194)
Kaba Malzeme Organik Madde İçeriği (%):	Yok	Yok	
Cilalanma Değeri: min.	50		TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti (DOP'lu)(%): min.	50		EK-A
Soyulma Mukavemeti (DOP'suz) (%): min.			

6.1.3 Bitüm

Çalışmada kullanılan bitüm B 50/70 sınıfı olup Tüpraş'tan alınmıştır. Bu değer bölgelerin iklim durumlarına göre değişiklik gösteren bir değerdir.

Bitümlü kaplama tabakalarının performansı ile sürüş konforunu artırmak, bakım ve onarım maliyetlerini azaltmak amacıyla yeni TS EN 12591 standardında yer alan bitüm sınıfları seçiminin; kaplamanın yapılacağı bölgenin iklim koşulları göz önünde bulundurularak Çizelge 6.3'de önerildiği şekilde yapılması uygun olacaktır [31].

Çizelge 6.3 : Bitüm sınıfları ve kullanılacak yerler.

Bitüm Sınıfı		Bitümün Kullanılacağı Yerler
BSK İçin	Sathi Kaplama için	
B 40/60 B 50/70	B 70/100	Akdeniz iklimin hüküm sürdüğü kesimler ve Güney Doğu Anadolu'nun güney kesimleri
B 50/70	B 100/150	Karadeniz, Marmara, iç Anadolu, iç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu'nun Kuzey kesimleri, Doğu Anadolu'nun Batı kesimleri
B 70/100	B 100/150	Yukarıda belirtilen bölgelerin çok soğuk kesimleri ile Doğu Anadolu'nun soğuk ve yüksek kesimleri

6.2 Kullanılan Yöntemler

Aşağıda, çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemleri ve deneyler sırasında kullanılan cihazlar hakkında bilgiler verilmiştir. Deney numunelerinin hazırlanabilmesi ve ilgili deneylerin yapılabilmesi için İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümüne ait yol laboratuvarlarında bulunan Marshall deney aleti, Marshall sıkıştırıcısı, Marshall numune kalıpları, su banyosu, etüv, hassas terazi ve elek serisi kullanılmıştır.

6.2.1 Agregalara uygulanan deneyler

Deneysel çalışmanın amacını oluşturan aşınma tabakası için belirlenen granülometrideki doğal agrega ve EAF cürufu numunelerinden, asfalt briket numunelerini üretmeden önce, fiziksel özelliklerinin tespit edilebilmesi için numuneler üzerinde özgül ağırlık ve su emme, elek analizi, Los Angeles aşınma, yassılık indeksi, soyulma, ve agrega cilalanma değeri tayini olmak üzere standart agrega deneyleri yapılmıştır.

6.2.1.1 Elek analizi

Elek analizi deneyi, agregaların tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesini kapsar [32]. Agrega numunesi içindeki tanelerin büyüklüklerine göre dağılımına granülometri, agregada tanelerin dağılımını gösteren eğriyede 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. Elek analizi deneyinde, araziden alınan tüvenan agregası havada kurutulduktan sonra, agregası numunesi önce 4 no.lu elekten elenerek iri ve ince agregası olarak ikiye ayrılır. 4 no.lu elek üzerinde kalan çakıl boyutundaki malzeme 1 ½, 1, ¾, ⅜ nolu kare delikli elekten geçirilir (4 no.lu elek üzerinde kalan malzeme buna dahildir). Eleme işlemi bittikten sonra elekler tel fırçayla temizlenerek her elek üzerinde kalan malzeme tartılır. 4 no.lu elek altında kalan ince agregası (kum) 8, 16, 30, 50, 100 no.lu eleklerden elenerek artanı tepsi içinde kalmak suretiyle her elek üzerinde kalan malzeme tartılır ve kalan % miktarları hesaplanır. Kalan % miktar aşağıdaki eşitlikten hesaplanır. Çalışmalarda Amerikan Elek sistemi kullanılmıştır. Çizelge 6.4'te bu elek sistemi verilmiştir [33].

$$\%Kalan = \frac{\text{Elekte Kalan}}{\text{Toplam Numune Miktarı}} \times 100 \quad (6.1)$$

Çizelge 6.4 : Amerikan elek sistemi.

Amerikan Elekleri (ASTM)	
Elek No	Boyut (mm)
(1 ½'')	37,5
(1'')	25,0
(¾'')	19,0
(½'')	12,5
(⅜'')	9,5
No.4	4,75
No.8	2,38
No.10	2,00
No.16	1,19
No.20	0,84
No.30	0,59
No.40	0,425
No.50	0,297
No.80	0,180
No.100	0,149
No.200	0,075

6.2.1.2 Özgöl ağırlık deneyleri ve su emme oranları

Bunlar, agrega numunesinin özgöl ağırlık ve su emme oranını belirleyebilmek için uygulanan deney yöntemlerini kapsar [34].

Özgöl ağırlık, belli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtık suyun havadaki ağırlığına oranıdır.

Doygun kuru yüzey, agreganın, yapısındaki boşlukların su ile dolu, yüzeyin kuru olduğu durumdur.

Su emme deneyi, doymun kuru yüzey (DKY) agreganın, kuru agregaya göre içerdği su oranını belirlemek için yapılmaktadır. Deneyde agrega örneği, 24 saat su içinde bekletildikten sonra tane yüzeyleri kurutularak DKY hale getirilip ve tartılmaktadır. Daha sonra örnek $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tartılır. Deney sonunda örneğin, DKY ağırlığının, DKY ağırlığından kuru ağırlığın çıkarılması ile elde edilen değere oranı, agreganın su emme değerini vermektedir.

Agregaların su emme yeteneği boşluk hacimlerinin oranı ile ilgili olmaktadır. Boşluklu olan agregalarda su emme oranı fazla olmaktadır. Su emme oranı fazla olan agreganın dona karşı dayanımı da düşük olacaktır. Bu sebeple, beton karışımlarında ve karayolu yapımında kullanılacak agregalarda su emme oranının düşük olması istenmektedir.

Agreganın özgöl ağırlık değerinin önemi; betonda yer alabilecek malzeme miktarlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Kaba agregalar için özgöl ağırlık deneyi ve su emme oranı

Özgöl ağırlık belirli hacimdeki numune ağırlığının aynı hacimdeki $+4^{\circ}\text{C}$ 'deki suyun ağırlığına oranıdır. ASTM C 127 metodu kullanılarak kaba agrega su emme ve özgöl ağırlığı belirlenmiştir. Kullanılan agrega örneğinden yaklaşık 1 kg alınır. Hazırlanan numune yıkanarak su içinde 24 saat bekletilir. Su içinden çıkarılan numune emici özelliğe sahip olan bir bez üzerine yayılarak agrega taneleri kurulur. Doymun kuru yüzey (DKY) hale gelmiş agrega numunesi tartılır (B). Tel sepete konulan agrega numunesinin $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda tartımı yapılır (C). Numune tel sepet içinden bir tepsiye boşaltılarak $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat kadar kurutulur. Etüvden çıkartılan numune 1 ile 3 saat arasında oda sıcaklığında soğutularak

tartılır(A). Özgül ağırlık değerleri ve su emme yüzdesi aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanır.

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

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

$$\text{Su Emme Yüzdesi (\%)} = \frac{B}{B-A} \times 100 \quad (6.4)$$

Burada:

A= Kuru ağırlık (gr)

B=Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)

C=Sudaki ağırlık (gr)

İnce agregalar için özgül ağırlık deneyi ve su emme oranı

İnce agregası su emme miktarı ve özgül ağırlığı ASTM C 128 yöntemi kullanılarak belirlenir [35]. Karışım granülometrisini temsil edecek şekilde en az 1000 gr agregası kullanılır.

200 no.lu elekten geçenyıkanan malzeme bir tepsi içine alınarak üzeri su ile kaplanır ve 24 saat su içinde bekletilir. Daha sonra, ince malzeme kaybına neden olmayacak şekilde suyu süzülür ve emici olmayan düzgün bir yüzey üzerine serilir.

Numuneyi doymuş kuru yüzey hale getirebilmek için sıcak hava akımı karşısında devamlı karıştırılarak kurutma işlemine tabi tutulur. Bu işleme, malzeme serbest dökülebilir hale gelinceye kadar devam edilir. Bu anı tespit etmek için koni yöntemi uygulanır.

Doygun kuru yüzey hale gelen yaklaşık 500 gr numune piknometre içine konarak tartılır (C_i). Üzerine numune yüzeyini kaplayacak seviyede su ilave edilir. Hava kabarcıklarının çıkması için piknometre her iki yönde 15-20 dakika çalkalanır. Daha sonra piknometrenin boş kısmı işaret çizgisine kadar su ile doldurulur. 25 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su ve malzeme sıcaklığı 25 °C'ye ulaştığında piknometre su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır (D_i). İnce agregası piknometreden bir tepsiye boşaltılır ve 110 ± 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune soğutulur ve tartılır (E_i). İnce agregasının özgül ağırlık ve su emme yüzdesi aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlık} = \left(\frac{E_i}{(B_i - C_i) - (A_i - D_i)} \right) \quad (6.5)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \left(\frac{E_i}{(B_i + E_i - D_i)} \right) \quad (6.6)$$

$$\text{Su Emme Yüzdesi (\%)} = \left(\frac{(C_i - A_i - E_i)}{E_i} \right) \times 100 \quad (6.7)$$

Burada;

A_i : Piknometre ağırlığı (gr)

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

C_i : Piknometre ve doymuş kuru yüzey numune ağırlığı (gr)

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

E_i : Kuru numune ağırlığı (gr)

Mineral filler için özgül ağırlık deneyi

110 + - 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulan filler malzemesi şişenin üçte biri dolacak şekilde piknometre içine konularak tartılır (C_f). Piknometrenin yarısına kadar su doldurulur ve en az 5 dk, yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan desikatör içinde bırakılarak havası alınır. Daha sonra piknometre tamamen su ile doldurularak 25 ± 1 °C'lik su banyosunda en az 60 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılır ve kurularak tartılır (D_f). Fillerin zahiri özgül ağırlığı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \left(\frac{(C_f - A_f)}{(B_f - A_f) - (D_f - C_f)} \right) \quad (6.8)$$

A_f : Piknometre ağırlığı (gr)

B_f : 25 °C' deki su dolu piknometre ağırlığı (gr)

C_f : Piknometre ve doymuş kuru yüzey numune ağırlığı (gr)

D_f : 25 °C' deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (gr)

6.2.1.3 Los Angeles deneyi

Los Angeles (aşınma) deneyi, kaba agregaların parçalanma direncinin tayini için uygulanan yöntemdir. Los Angeles (aşınma) deneyinde kullanılan cihaz iki tarafı kapalı, eksen etrafında dönebilen, içi boş çelik silindirden oluşmaktadır. Silindir

içinde belirli ağırlıkta ve sayıda çelik bilyeler mevcuttur. Los Angeles (aşınma) deneyi için 10–12,5 mm göz açıklı elekler arasında kalan numuneden 3500 gr, 12,5–14 mm göz açıklı elekler arasında kalan numuneden 1500 gr olmak üzere toplam 5000 gr numune yıkanarak $110 \pm 5^\circ \text{C}$ 'deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve tartılır (M_1). Cihaza önce 12 adet çelik bilye, sonra etüvde kurutulmuş numune konur. Kapak kapatılır ve cihaz 31 devir/dakika ila 33 devir/dakika arasında sabit hızda 500 devir döndürülür. İşlem sonunda silindir içindeki agregalar tepsiye dökülür. Döküm sırasında agrega kaybını önlemek için cihazdaki açıklık tepsinin tam üstüne getirilmelidir. Deney numunesi 1,6 mm göz açıklı elekte elenerek elek üzerinde kalan numune tartılır (M_2). Burada; elekte kalan örnek ağırlığının daha önceki örnek ağırlığına oranı, % olarak agregada meydana gelen aşınmayı göstermektedir. Beton ve karayolu yapımında kullanılan agregalar atmosferik ve mekanik etkiler sebebiyle aşınmaya, parçalanmaya, ufalanmaya ve kırılmaya maruz kalmaktadır. Bu yüzden, agregaların kullanım yerlerine göre belli aralıklardaki sınır değerlerinde aşınmaya karşı dayanıklı olması istenmektedir. Bu deneyin yapımında TS EN 1097–2 veya ASTM C 131 standardı takip edilebilir. Şekil 6.1'de bu deneyin yapıldığı Los Angeles cihazına ait bir görüntü verilmiştir. Los Angeles aşınma oranı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır [36].

$$\text{LA \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (6.9)$$



Şekil 6.1 : Los Angeles aşınma deneyinde kullanılan cihaz.

6.2.1.4 Yassılık indeksi deneyi

Agregalardaki yassı madde oranını belirlemek için; TS EN 933-3 standardı kullanılmaktadır [37]. Bu deneyde; 4mm ile 80mm göz açıklıklı elekler arasında kalan malzemelerden, standartlarda belirtilen oranda örnek alınır.

Deney numunesi $110\pm5^{\circ}\text{C}$ deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulup, tane büyüklüğü sınıflanarak tartılmaktadır. Daha sonra örnek, ait olduğu sınıfa göre silindirik çubuklu eleklerde elenmekte ve çubuklu elekten geçen her tane büyüklüğü tekrar tartılmaktadır. Bu ağırlığın ilk ağırlığa oranı agregada yassı malzeme oranını vermektedir. Ölçülen tane boyutları arasındaki oran, 0,6'dan küçük olduğu durumlarda malzeme yassı olarak kabul edilmektedir. Agregadaki yassı malzeme oranının çok olması betonda pürüzlü bir yüzeye ve su ihtiyacının artmasına neden olacaktır. Karayollarında, yassı agrega oranının çok fazla olması, yolun dayanım özelliklerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Tane büyüklüğü, 8mm'den büyük agrega tanelerinde kusurlu tanelerin oranı % 50'den fazla olmamalıdır. Bunun için, agregaların tane boyutlarının mümkün olduğunca orantılı olması istenmektedir.

6.2.1.5 Soyulma deneyi

Kırılmış agrega numunesinin 9,5-6,3 mm'lik elekler arasında kalan kısmından 200 gr alınarak iyice yıkanır, saf su ile birkaç kere çalkalandıktan sonra 1100°C 'lik etüvde kurutulur. Yıkanmış kurumuş malzemeden 100 ± 0.5 gr numune beher içinde tartılır ve ısıtılmak üzere 1 saat 1400°C - 1500°C 'lik etüvde bekletilir.

Diğer taraftan, mıcır numunesi hangi tip bitümlü kaplamada kullanılacaksa, o kaplamada kullanılacak bitümlü bağlayıcıdan $5,0\pm0,1$ gr 250 cm^3 'lük bir beher içinde tartılır. Bitümlü bağlayıcı ihtiva eden beher bir kum banyosuna yerleştirilir ve ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı eriyince etüvde ısıtılmış mıcır derhal behere dökülür ve bir cam bagetle, bütün mıcır tanelerinin üzeri homojen bir bitüm filmi ile kaplanıncaya kadar, kum banyosu üzerinde iyice karıştırılır. Beherdeki karışım, 10 cm çapındaki iki petri kabına eşit miktarda aktarılır ve kaplanmış mıcırların üzeri bagetle çok hafif darbelerle düzeltilir. 10 dakika laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Sonra petri kapları, saf su ile dolu derin bir tepsi içerisine batacak ve petri kaplarının üzerinde en az 3 cm su olacak şekilde yerleştirilir. 24 saat süreyle bekletilmek üzere 600°C 'lik etüve konur. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarı alınır, suyu değiştirilir, yandan gelen bir ışık altında bilhassa karışımın üst yüzü gözle incelenir.

Deney sonunda tüm agrega tanelerinin soyulmamış yüzeylerinin bütün yüzeye oranı, soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir [14].

6.2.1.6 Cilalanma deneyi

Bu deneyin amacı, çeşitli yol agregalarının trafik altında sürtünme ile aşınarak ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuvarda kısa bir zamanda saptamaktır. Cilalanma direnci düşük agregalar zamanla düşük sürtünme kuvvetine veya kayma direncine sahip yüzeyler oluşturacağı için kaplamanın sürüş emniyeti de azalacaktır.

Agrega cilalanma değeri ile kaymaya karşı direnç arasındaki ilişki, trafik koşulları, kaplamanın tipi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Deney iki kısımdan oluşur. Birinci kısımda taş numuneleri özel bir makina ile hızlandırılmış olarak cilalanmaya tabi tutulur. İkinci kısımda, her bir numunenin cilalanma değeri, uygun bir sürtünme deneyi ile ölçülür ve taşın laboratuvar cilalanma değeri olarak tayin edilir.

Hızlandırılmış cilalanma makinası, çevresinde 14 adet numunenin (briketin) yerleştirilebileceği, dakikada 315-325 devir hızla dönen 40,6 cm çapında bir demir tekerlek ile numunelerin üzerinde dönen 20,3 cm çapında, 5 cm genişliğinde, $3,16 \text{ kg/cm}^2$ basınç ile şişirilmiş ve numunelerin yerleştiği demir tekerleğe 40 kg'lık yük uygulayan bir lastik tekerlekten oluşur.

Kayma direncini ölçme cihazı ise, bir ucunda ağırlık olan bir pandül, bunun altında numuneye sürtünen ve belirli özellikleri bulunan lastik bir papuç ile, göstergeden ibarettir.

Deneyde kullanılacak her taş için en az 3 kg'lık 10 mm nominal boyutta numune alınır. Numune taneleri 10 mm'lik BS eleğinden geçip, 10-14 mm'lik yassılık eleği üzerinde kalmalıdır. Numunede yassı tane bulunmamalı, temiz ve tozsuz olmalıdır. Cilalanma deneyine alınan tanelerin yüzey yapısı, taşın ortalama yüzey yapısını temsil etmelidir. Daha pürüzlü veya daha düzgün yüzey yapısına sahip bir iki parça bile olsa bunlar, deney numunesinin hazırlanmasında kullanılmamalıdır. Deneye, cilalanma değeri bilinen referans agrega ile kontrol için hazırlanan 2 adet numune de dahil edilmelidir. Bir numunedeki agrega sayısı 35-50 arasında olmalı ve aralarındaki boşluklar çok ince kum ile doldurulmalıdır.

Bu şekilde hazırlanan numuneler, belirli bir küre tabi tutulduktan sonra üzerlerine istenen hızda zımpara tozu ve su akıtılarak hızlandırılmış cilalanma makinasında

6 saat süreyle cilalanmaya uğratılır. Her numunenin deney sonucunda eriştiği cilalanma değeri, kayma direncini ölçme cihazının ıslatılmış lastik papucu ile ıslatılmış numune yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı olarak cihazın göstergesinden okunur. Bu işlem, bir numune için 5 kez tekrarlanır ve son üç okumanın ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılarak kaydedilir. Her bir agrega grubu için hazırlanan üç numunenin değerlerinin sıralaması 5 birimden daha fazla ise veya kontrol numunelerinin değeri bilinen değerler arasında kalmıyorsa deney tekrarlanmalıdır. Eğer üç numuneden alınan değerler arasındaki fark 5 birim veya daha az ve de kontrol numunelerinin ortalama değerleri de uygun ise, üç numunenin ortalaması alınarak cilalanma değeri bulunur. Kayma direnci değeri 0,5'den küçük olmamalıdır [38].

6.2.1.7 Organik madde içeriği deneyi

Humuslu ve diğer organik maddeler ince dağılmış halde iken betonun sertleşmesine ve de yol üst yapısına zarar verebilirler. Bunlar, taneli halde bulundukları zaman renk değişimine veya şişerek betonun yüzeyinde patlamalara, yolda çatlamalara neden olabilirler. İnce dağılmış, sertleşmeye zarar veren organik maddelerin varlıkları hakkındaki bilgi, agreganın sodyum hidroksitle muayenesinden elde edilir. Ancak, şeker ve benzeri maddelerin bulunup bulunmadığı bu şekilde anlaşılamaz. Sodyum hidroksitle yapılan deneyde sıvı renginin renksizden açık sarıya kadar olması halinde organik maddelerin önemli miktarda bulunmadığına karar verilebilir. Koyu sarı, kahverengi veya kırmızı rengin olması halinde, bu renklerin az miktardaki taneli organik maddelerden kaynaklandığı kuşkusu yoksa zararlı miktarda organik maddelerin bulunduğuna karar verilebilir. Bu sınırlar, agreganın tane sınıflarına ayrılmış olarak kullanılması halinde her bir tane sınıfına uygulanır. Şüpheli hallerde söz konusu agrega ile beton yeterlik deneyi yapılmalıdır. Doğal agregada bulunan kömür veya diğer şişen organik maddelerin yoğunluğu, mineral kaynaklı maddelerin yoğunluğu, mineral kaynaklı agrega tanelerinin yoğunluğundan genellikle daha düşük olur. Bu nedenle görünümüne göre ayıklanarak bulunan veya bunun yeterli sayılmadığı hallerde $2,0 \text{ kg/dm}^3$ yoğunluklu sıvıda yüzdürülerek bulunan taneli organik madde miktarı aşınma tabakasında hiç bulunmamalıdır [39].

6.2.2 Bitüme uygulanan deneyler

6.2.2.1 Penetrasyon deneyi

Yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının viskozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon ölçmek için kullanılan alete penetrometre denir. Şekil 6.2'de penetrasyon deney aleti görülmektedir.



Şekil 6.2 : Penetrasyon deney aleti.

Deney yapılırken penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. Numune 25 °C sıcaklıkta olmalıdır. İstenen ağırlıkta (genellikle 100 gr) numune yüzeyine ancak degecek şekilde ayarlanır. İğne belirli bir zaman aralığında serbest bırakılır. Genellikle 5 sn'lik zaman bitiminde penetrasyon değeri okunur. Kabın kenarından ve birbirinden 1'er cm' lik uzaklıkta en az 3 okuma yapılır.

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 [40].

Normal yol işlerinde kullanılan asfaltların penetrasyonu 30 ile 300 arasında değişir. Penetrasyonu aynı olan iki asfalttan yumuşama noktası yüksek olan sıcaklığa daha dayanıklıdır [41].

6.2.2.2 Özgül ağırlık deneyi

Bir bağlayıcının özgül ağırlığı bunun belli bir hacminin ağırlığının aynı hacimde su ağırlığına oranıdır. Bir bağlayıcının özgül ağırlığı başlıca iki bakımdan önemlidir. Birincisi; çok defa ağırlıkla hacim arasındaki bağıntının bilinmesi faydalıdır. Bitümlü kaplamalara ait şartnamelerde oranlar ağırlıkça yüzde cinsinden belirtilir. Buna

karşılık bağlayıcılar çok defa hacimce ölçülür. Sıcak karışımlarda ise bağlayıcının genleşme katsayısının belirlenmesi faydalıdır. Böylece herhangi bir sıcaklıktaki özgül ağırlık hesaplanabilir. İkincisi; özgül ağırlık, hidrokarbonlu bağlayıcının cinsinin bilinmesi açısından yararlıdır [42].

Özgül ağırlık tayini için piknometre yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, önce boş piknometre kabı kuru olarak tartılır, daha sonra su ile doldurulur ve tekrar tartılır.

Piknometre kabı boşaltılır, kurutulur, içine genellikle yüksekliğin 2/3'üne kadar ya küçük parçalar halinde veya eritilmiş halde, uygun miktarda bağlayıcı akıtarak konur. Eğer ısıtılmış malzeme akıtılacak ise, malzeme içinde hava kabarcıkları kalmamasına dikkat edilmesi gereklidir. Piknometre içinde kalan boşluk su ile doldurulur ve tartılır. Deneyde kullanılacak su saf su olmalıdır. Deney, genellikle 25°C'de yapılır. Deney, farklı sıcaklıklarda yapılacaksa 25°C'ye çevirmek için çeşitli abaklardan yararlanılır [9].

$$\text{Özgül Ağırlık} = \text{kN/cm}^3 = \left(\frac{C-A}{B-A-(D-C)} \right) \quad (6.10)$$

Burada;

A=Piknometre ağırlığı(gr)

B= Su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)

C= Piknometre ve asfalt ağırlığı (gr)

D= Piknometre, asfalt ve su ağırlığı

6.3 Marshall Yöntemi ile Bitümlü Karışımların Tasarımı

Bu yöntem, A.B.D.'de, Mississippi Devlet Otoyolları Departmanında çalışan Bruce Marshall tarafından geliştirilip formüle edilmiştir. Prensip olarak yöntem, Marshall Stabilitate deney aleti yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar. Bu yöntem, maksimum boyutu 25 mm (1 inç) veya daha az olan agregalar ve penetrasyon veya viskozite derecesi belli asfalt çimentoları kullanılarak hazırlanmış, yalnızca sıcak karışimli asfalt kaplamalara uygulanır [43]. Dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemiz karayollarında da karışım dizaynlarında bu yöntem kullanılmaktadır.

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

- Karışımda kullanılacak malzemeler proje şartnamelerinde istenen özelliği sağlamalıdır.
- Agreg a karışım granölometrisinin şartname granölometrisine uygun olması sağlanmalıdır.
- Kullanılacak malzemelerin yoğunluk ve boşluk analizleri, karışımda kullanılacak agregaların hacim özgül ağırlıkları ve asfalt çimentosunun özgül ağırlıkları tespit edilir [41].

6.3.1 Deney numunelerinin hazırlanması

Deney numuneleri hazırlanırken tasarım için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için belirlenen Tip-1 granölometri limitleri kullanılmıştır. Bu limitlere göre kullanılan agregalardan 3750 gr'lık karışımlar hazırlanır. Hazırlanan bu agreg a karışımları ve bitüm etüve konularak sıcaklıklarının 3–4 saat süre boyunca 160 °C'ye gelmesi beklenir. Şekil 6.3'te, kullanılan etöv görölmektedir.



Şekil 6.3 : Etöv.

Sıkıştırma işlemine başlamadan yarım saat öncesinde numune kalıpları, tokmak başlığı, karıştırma kabı, spatula, metal numune küreği gibi metal aparatlar da etöv içine yerleştirilerek ısıtılır. Isıtma işleminden sonra, agreg a ve bitüm tamamıyla üniform bir asfalt dağılımına sahip karışımı meydana getirmek için, karıştırıcı ile

homojen bir dağılım elde edilene kadar 3–5 dakika karıştırılır. Şekil 6.4'te mekanik asfalt karıştırıcısı görülmektedir.



Şekil 6.4 : Mekanik asfalt karıştırıcısı.

Her agrega ve bitüm karışımlarından en az üç adet numune hazırlanır. Çalışmada, her üçlü seri için bitüm oranları %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %7 şeklinde kullanılmıştır. Sonuç olarak her farklı agrega malzemesi için 21 numune hazırlanmıştır. Doğal agrega ve EAF cürufu kullanılarak toplamda 42 adet numune üretilmiştir.

Asfalt çimentosu ve sıvı petrol asfaltın 170 ± 20 °C viskozite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık, karıştırma sıcaklığıdır. Karışım kalıbın içine yerleştirilmeden önce kalıbın tabanına, ölçüsüne göre kesilmiş filtre kâğıdı yerleştirilir. Numuneler 101,6 mm (4 inç) çapında ve 76,2 mm (3 inç) yüksekliğindeki numune kalıbında, 457,2 mm (18 inç) den düşen 4536 gr (10 lb) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Sıkıştırma uygulanacak numunelerin her iki yüzeyine 75 darbe uygulanır. Sıkıştırmadan sonra numuneler, oda sıcaklığında, hareket esnasında deformasyon yapamayacak duruma gelene kadar soğumaya bırakılır. Şayet hızlı soğuma istenirse fan kullanılabilir. Şekil 6.5'te numuneleri sıkıştırma işleminde kullanılan otomatik tokmak görülmektedir.



Şekil 6.5 : Deney numunelerini sıkıştırma için kullanılan otomatik tokmak.

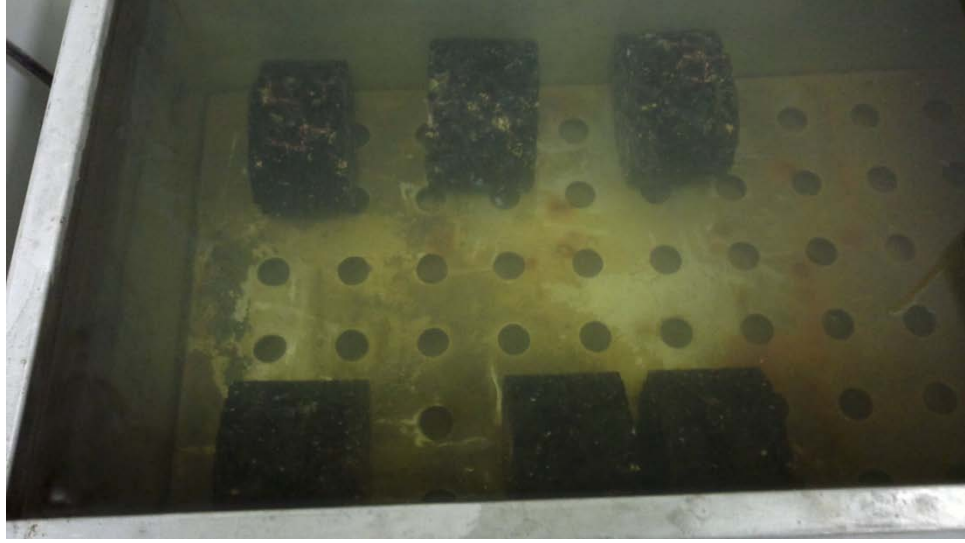
6.3.2 Marshall akma ve stabilite deneyi

Oda sıcaklığına kadar soğumuş olan briket numune kalıptan bir numune çıkarma krikosu yardımı ile çıkarılarak, en az 24 saat laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Bir kumpas yardımıyla yükseklikleri ölçülen numunelerin havada, 25 °C suda ve suya doymun kuru yüzey durumdaki tartımları yapılır. Şekil 6.6'da deneylerde kullanılan numuneler görölmektedir.



Şekil 6.6 : Marshall deney numuneleri.

Numuneler stabilite ve akma deneyine tabi tutulmadan önce 60 ± 1 °C'lik su banyosunda 30-40 dakika bekletilir. Şekil 6.7'de su banyosunda deney için beklemeye bırakılmış numuneler görülmektedir.



Şekil 6.7 : Su banyosu.

Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Akma ölçer (flowmeter) yerleştirilerek sıfırlanır. Maksimum yüke erişinceye kadar, dakikada 50,8 mm'lik (2 inç) bir hızla yükleme yapılır. Maksimum yük kaydedilir. Akmaölçer boşaltılır ve akma değeri ölçülür. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 sn'den fazla olmamalıdır. Numune yüksekliği 63,5 mm'den (2 ½ inç) farklıysa Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır. Çizelge 6.5'te ASTM D 6927-06'ye göre belirlenen düzeltme faktörleri gösterilmektedir [44].

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 agreg a boşluğu yüzdesi de saptanır [9].

Çizelge 6.5 : Marshall stabilite değerleri için düzeltme faktörleri [44].

Numune Hacmi cm ³	Numune Kalınlığı mm	Düzeltilme Faktörü
329 - 340	41,3	2,27
341 - 353	42,9	2,08
354 - 367	44,4	1,92
368 - 379	46,0	1,79
380 - 392	47,6	1,67
393 - 405	49,2	1,56
406 - 420	50,8	1,47
421 - 431	52,4	1,39
432 - 443	54,0	1,32
444 - 456	55,6	1,25
457 - 470	57,2	1,19
471 - 482	58,7	1,14
483 - 495	60,3	1,09
496 - 508	61,9	1,04
509 - 522	63,5	1,00
523 - 535	65,1	0,96
536 - 546	66,7	0,93
547 - 559	68,3	0,89
560 - 573	69,8	0,86
574 - 585	71,4	0,83
586 - 598	73,0	0,81
599 - 610	74,6	0,78

Şekil 6.8'de Marshall deney aleti ve deney uygulanmış numune görülmektedir.



Şekil 6.8 : Marshall deney aleti.

6.3.3 Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi

TS 3720'ye göre, bitümlü karışımda optimum bitüm miktarı, karışımın deneyle tayin edilmiş ve hesaplanmış özelliklerinin karışımın tasarlanan kullanım gerekleri ile karşılaştırılmasıyla tespit edilir. Öncelikle, deney sonucu elde edilen grafiklerden, karışımın tasarlanan kullanım gereklerinde belirtilen hava boşluğu sınırlarının orta noktasına karşılık gelen bitüm içeriğinin seçilmesi önerilir. Bu bitüm yüzdesinde hesaplanmış ve deneyle tayin edilmiş karışım özellikleri grafikten bulunur. Bulunan değerler karışımın tasarlanan kullanım gereklerini karşılıyorsa, bu bitüm oranı “optimum bitüm” olarak verilir. Aksi takdirde, bitüm içeriğinde bazı değişiklikler yapılması veya karışımın yeniden tasarlanması gerekir.

Ayrıca, karışımın tasarlanan kullanım gereklerine göre optimum bitüm miktarı şu şekilde de tespit edilir; değişen bitüm içeriklerinde, sıkıştırılmış kaplama karışımındaki, agregalar arası boşluk (VMA), bitümle dolu boşluk (VFB), havayla dolu boşluk (V_h) ve stabilite için bütün gerekleri sağlayan bitüm aralığı saptanır ve bu değerlerin ortalaması optimum bitüm içeriği olarak alınır.

Optimum bitüm yüzdesi belirlenirken, genellikle boşluk değeri göz önünde bulundurulur.

-aşınma tabakası için %4 boşluk

-binder tabakası için %4-%5 boşluk

-bitümlü temel tabakası için %5-%6 boşluk uygundur.

Boşluk esas alınarak diğer değerlerin şartname kriterlerine uygun olup olmadığına bakılır. Karışımın kullanılacağı bölgenin iklim koşulları da göz önünde bulundurularak bitüm miktarı belirlenir. Soğuk bölgelerde, durabilite ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanıklı bir tabaka oluşturmak için bitümü daha zengin fakat kuma meydana getirmeyecek karışımlar, sıcak bölgeler için plastik deformasyonu azaltacak ancak yeterli durabiliteyi sağlayacak karışımlar oluşturulmalıdır.

Ayrıca, yüzey tabakası olan asfalt betonu aşınma tabakasında pürüzlülüğü arttırmak ve kaplamayı kaymaya karşı dirençli hale getirmek için;

-Sert ve pürüzlü agreganın kullanımı,

-Karışım granülometrisine orta malzemeyi arttırarak bir miktar kesiklilik,

ekonomik koşullarda göz önünde bulundurularak, tercih edilmelidir [45].

6.4. Kaplama Karışım Hesapları için Gerekli Bağıntılar

6.4.1. Agreg a hacim özgül ağırlığı ve zahiri özgül ağırlığı

Agreg a karışımı, değişik özgül ağırlıklara sahip kaba agreg a, ince agreg a ve mineral fillerden oluştuğu için, toplam agreg anın hacim veya zahiri özgül ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{hg} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kh}} + \frac{\%İ}{G_{ih}} + \frac{\%F}{G_{fh}}} \quad (6.11)$$

$$G_{za} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kz}} + \frac{\%İ}{G_{iz}} + \frac{\%F}{G_{fz}}} \quad (6.12)$$

Burada:

G_{hg} : Agreg a karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{hg} : Agreg a karışımının zahiri özgül ağırlığı

K: Kaba agreg anın ağırlıkça yüzdesi

İ: İnce agreg anın ağırlıkça yüzdesi

F: Fillerin ağırlıkça yüzdesi

G_{kh} : Kaba agreg anın hacim özgül ağırlığı

G_{ih} : İnce agreg anın hacim özgül ağırlığı

G_{fh} : Fillerin hacim özgül ağırlığı

G_{kz} : Kaba agreg anın zahiri özgül ağırlığı

G_{iz} : İnce agreg anın zahiri özgül ağırlığı

G_{fz} : Fillerin zahiri özgül ağırlığı

6.4.2. Agreg a efektif özgül ağırlığının tayini

Agreg a tarafından emilen asfalt hacmi, emilen suyun hacminden daha azdır. Bunun sonucu olarak agreg anın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değeri arasında olmalıdır. Efektif özgül ağırlık bu limitlerin dışına düştüğünde değerin yanlış olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda ASTM D 2041'e göre yapılan

teorik özgül ağırlık deneyi yeniden gözden geçirilmelidir. Bu deneyin yapılamadığı durumlarda, hacim özgül ağırlık ve zahiri özgül ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak bulunan efektif özgül ağırlık değeri kullanılabilir [46].

$$G_{ef} = \frac{100}{\frac{100+W_a}{D_T} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (6.13)$$

Burada:

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm³)

W_a : Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

D_T : Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_b : Bitüm özgül ağırlığı (kN/cm³)

6.4.3. Farklı bitüm miktarlarında karışımın maksimum özgül ağırlığı

Her bir bitüm yüzdesindeki hava boşluğu hesaplanırken, farklı bitüm yüzdesindeki maksimum özgül ağırlığa ihtiyaç duyulur. ASTM D 2041'e göre deney yapılırken en sağlıklı sonucu alabilmek için, numune optimuma yakın bitüm yüzdesinde hazırlanmalı ve D_T için iki veya üç deney yapılmaya çalışılmalıdır. Bitüm miktarının değişmesi bitüm emme miktarını önemli ölçüde değiştirmedeği için, maksimum özgül ağırlık, D_T , aşağıdaki bitüm yüzdesi ile her bitüm yüzdesi için ayrı ayrı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir [46].

$$D_T = \frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (6.14)$$

Burada:

D_T : Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm³)

W_a : Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

G_{ef} : Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_b : Bitüm özgül ağırlığı (kN/cm³)

6.4.4 Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki agregalar arası boşluk (VMA) yüzdesi hesabı

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agregalar arasındaki boşluk olarak

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

$$VMA = 100 - \left(\frac{D_p \times (100 - W_a)}{G_{sb}} \right) \quad (6.15)$$

Burada:

VMA: Agregalar arası boşluk yüzdesi

D_p : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

W_a : Agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

6.4.5 Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu (V_h) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin (V_f) hesaplanması

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içerisindeki hava boşluğu (V_h), bitümle kaplanmış agrega taneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir.

$$V_h = \left(\frac{D_t - D_p}{D_t} \right) 100 \quad (6.16)$$

Burada:

V_h : Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu.(%)

D_p : Sıkıştırılmış karışımın (briketin) hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

D_t : Kaplama karışımın maksimum özgül ağırlığı (kN/cm³)

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

$$V_f = \left(\frac{VMA - V_h}{VMA} \right) 100 \quad (6.17)$$

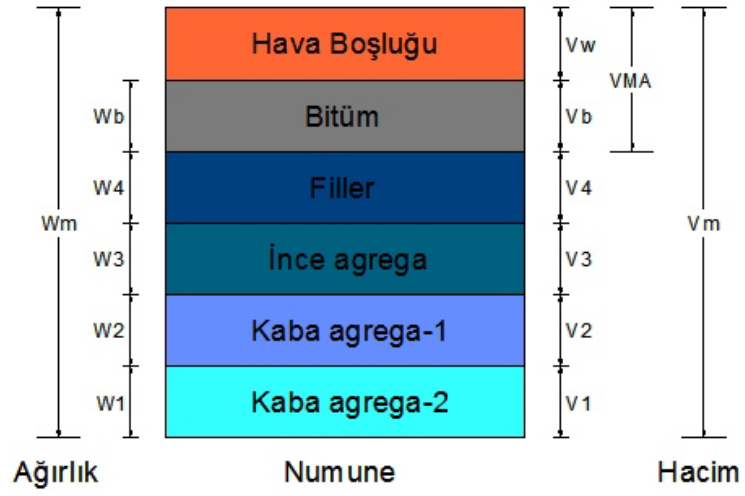
Burada:

V_f : Asfaltla dolu boşluk (%)

VMA: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

V_h : Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)

Şekil 6.9 'da genel olarak bir numunenin hacim-ağırlık durumu gösterilmiştir.



Şekil 6.9 : Numune hacim-ağırlık görünümü.

7. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölüm, çalışmanın konusunu oluşturan elektrik ark fırını cürufunun aşınma tabakasında agrega olarak kullanılabilirliğini belirleyebilmek için yapılmış olan deneylerin sonuçlarını içermektedir. Ayrıca kıyaslama için kullanılan doğal agrega ve bitüm ile ilgili elde edilen deney sonuçları da bu bölümde verilmiştir.

7.1 Agrega Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu deneyler yapılırken her deney için üçer adet numune kullanılmış çıkan sonuçların ortalamaları alınmıştır.

7.1.1 Granülometri

Cüruf atık olarak stoklanmakta olan bir malzemedir. Henüz bir ürün sınıfında değildir. Dolayısıyla, bu çalışmada agregalar, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için verilen Tip-1 granülometrisinin ortalamasına göre hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan granülometri limitleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Çalışmada kullanılan granülometri limitleri [14].

Elek Açıklığı		%Geçen	
mm	inç	Tip-1	Kullanılan %
19	3/4	100	100
12.5	1/2	83 - 100	91,5
9.5	3/8	70 - 90	80
4.75	No.4	40 - 55	47,5
2.00	No.10	25 - 38	31,5
0.425	No.40	10 - 20	15
0.180	No. 80	6 - 15	10,5
0.075	No.200	4 - 10	7

7.1.2 Özgöl ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

7.1.2.1 Kaba ve ince agreganın özgöl ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Çalışmada kullanılan kaba ve ince agreganın özgöl ağırlığının belirlenmesi için yapılan deneyler ve sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Kaba agreganın için özgöl ağırlık limit değerinin minimum $2,6 \text{ gr/cm}^3$ olması gerekmektedir [34]. Deney sonuçlarına göre, kaba EAF cürufu malzemesinin hacim özgöl ağırlık değeri $3,7 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuş ve bu değerin limit değerin üzerinde olduğu saptanmıştır. Doğal agreganın kaba hacim özgöl ağırlık değeri ise $2,85 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuş ve bu değerin limit değerin üzerinde olduğu saptanmıştır.

İnce agreganın için özgöl ağırlık limit değerinin minimum $2,25 \text{ gr/cm}^3$ olması gerekmektedir [35]. Deney sonuçlarına göre, ince EAF cürufunun $3,72 \text{ gr/cm}^3$ özgöl ağırlık değeri ile limit değerin üzerinde olduğu saptanmıştır. Doğal agreganın ince hacim özgöl ağırlık değeri ise $2,85 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuş ve bu değerin limit değerin üstünde olduğu saptanmıştır.

Çizelge 7.2 : Kaba ve ince agreganın özgöl ağırlık sonuçları.

Özellik	Değer gr/cm^3	Standart
EAF Cürufu		
Kaba agreganın hacim özgöl ağırlığı	3,70	ASTM C 127
Kaba agreganın zahiri özgöl ağırlığı	3,77	ASTM C 127
İnce agreganın hacim özgöl ağırlığı	3,72	ASTM C 128
İnce agreganın zahiri özgöl ağırlığı	3,81	ASTM C 128
Doğal agreganın		
Kaba agreganın hacim özgöl ağırlığı	2,85	ASTM C 127
Kaba agreganın zahiri özgöl ağırlığı	2,89	ASTM C 127
İnce agreganın hacim özgöl ağırlığı	2,85	ASTM C 128
İnce agreganın zahiri özgöl ağırlığı	2,90	ASTM C 128

Çalışmada kullanılan kaba ve ince agreganın su emme oranlarının belirlenmesi için yapılan deneyler ve sonuçları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Kaba agreganın için su emme oranı miktarının maksimum %2.5 olması gerekmektedir [34]. Deney sonuçlarına göre, kaba EAF cürufunun su emme oranı %3,69 olup bu değerin limit değerin üstünde olduğu görülmüştür. Kaba doğal agreganın su emme oranı %0,28 olup, bu değerin limit değerin altında kaldığı görülmüştür.

İnce agrega için su emme oranı miktarının maksimum %2.5 olması gerekmektedir [35]. Deney sonuçlarına göre, ince EAF cürufunun su emme oranı %3,75 olup, bu değer limit değer üstünde olduğu görülmüştür. İnce doğal agreganın ise su emme oranı %0,44 olup, bu değer limit değer altında kaldığı görülmüştür.

Çizelge 7.3 : Kaba ve ince agreganın su emme oranı sonuçları.

Özellik	Değer	Standart
EAF Cürufu		
Kaba agrega su absorpsiyonu %	3,69	ASTM C 127
İnce agrega su absorpsiyonu %	3,75	ASTM C 128
Doğal agrega		
Kaba agrega su absorpsiyonu %	0,28	ASTM C 127
İnce agrega su absorpsiyonu %	0,44	ASTM C 128

7.1.2.2 Mineral fillerin zahiri özgül ağırlığının belirlenmesi

Çalışmada mineral filler için şartnamede belirtilmiş olan %4 ve %10 değerinin ortalaması alınarak %7 oranında EAF cürufu ve doğal agrega kullanılmıştır. Kullanılan mineral fillerin özgül ağırlık sonuçları Çizelge 7.4' te verilmiştir.

Çizelge 7.4 : Mineral fillerin özgül ağırlık değerleri.

Özellik	Değer gr/cm ³	Standart
EAF cürufu özgül ağırlık	3,20	ASTM C 854
Doğal agrega özgül ağırlık	2,67	ASTM C 854

7.1.3 Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

Beton ve karayolu yapımında kullanılan agregalar atmosferik ve mekanik etkiler sebebiyle aşınmaya, parçalanmaya, ufalanmaya ve kırılmaya maruz kalmaktadır. Bu yüzden, agregaların kullanım yerlerine göre belli aralıklardaki sınır değerlerinde aşınmaya karşı dayanıklı olması istenmektedir. Agregaların aşınmaya karşı direncini tespit etmek için TS EN 1097-2'ye göre yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonuçları, karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.5'te görülmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için istenen şartname sınır değeri % 30'dur. Bulunan değerler % 30 olan kritik değer altındadır.

Çizelge 7.5 : Los Angeles aşınma değerleri.

Numune	LA Aşınma Değeri %	Şartname Değeri
EAF Cürufu	21	30
Doğal Agregası	19,28	30

7.1.4 Yassılık indeksi deneyi sonuçları

Agregadaki yassı malzeme oranının çok olması betonda pürüzlü bir yüzeye ve su ihtiyacının artmasına neden olacaktır. Karayollarında, yassı agrega oranının çok fazla olması, yolun dayanım özelliklerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için belirlenen değer max. % 30'dur. Yani agregadaki yassılık indeksi değerinin % 30'dan yüksek olmaması istenmektedir [37]. Yapılan deneyler sonunda, EAF cürufunun yassılık indeksi % 8 bulunmuştur. Bu değer, sınır değerinin altındadır.

7.1.5 Soyulma deneyi sonuçları

Suyun etkisi ile asfalt film tabakası agregadan soyulursa karışımın kohezyonu ve stabilitesi azalır. Dolayısıyla, bu deney ile agregaların soyulma dirençleri hakkında fikir edinilir. Aşınma tabakası için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilen değere göre, soyulma mukavemetinin minimum % 50 olması istenmektedir. Deneyler, soyulma mukavemetini artırıcı katkı kullanılarak ve katkı kullanılmadan iki şekilde yapılmıştır. EAF cürufu için katkı kullanılmadan bulunan soyulma mukavemeti değeri %60-70 arasında bulunmuştur. Mukavemet artırıcı katkı kullanılarak bulunan değer ise, % 90-100 olarak bulunmuştur. EAF cürufunun her iki şekilde de şartnamede verilen değeri sağladığı görülmüştür.

7.1.6 Cilalanma deneyi sonuçları

TS EN 1097-8'e göre yapılan çalışmalar sonucunda EAF cürufu için bulunan cilalanma değeri 66,4'tür [38]. Aşınma tabakası için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilen değere göre, cilalanma değerinin minimum 50 olması istenmektedir. Deney sonucunda elde edilen değer, şartnamede verilen değeri sağladığı görülmüştür.

7.1.7 Organik madde içeriği deneyi sonuçları

Agrega içindeki var olan çürümüş bitki kökleri, ağaç ve odun kalıntıları betonun priz süresinin uzamasına, betonun su ihtiyacının artmasına ve dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, yol yapımında, yolda pürüz, boşluk ve çatlamalara sebebiyet verdiği için istenmeyen bir durumdur. Şartname değerlerine göre bitümlü temel ve binder tabakalarında max. 0,5 değerine izin verilmekte, aşınma tabakası için ise, bu maddelerin agregada hiç bulunmaması istenmektedir. Aşınma tabakası için yapılan deneyler sonucunda organik madde içeriği bulunmamıştır. Verilere göre numune şartname değerlerine uymaktadır.

7.2 Bitüm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan bitümün özgül ağırlığı 1,029 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Bitüm üzerinde uygulanan deneyler, kullanılan deney standartları, şartname limitleri ve bazı deneylerin ölçülen sonuçları Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6 : Bitüme uygulanan bazı deneyler ve değerleri.

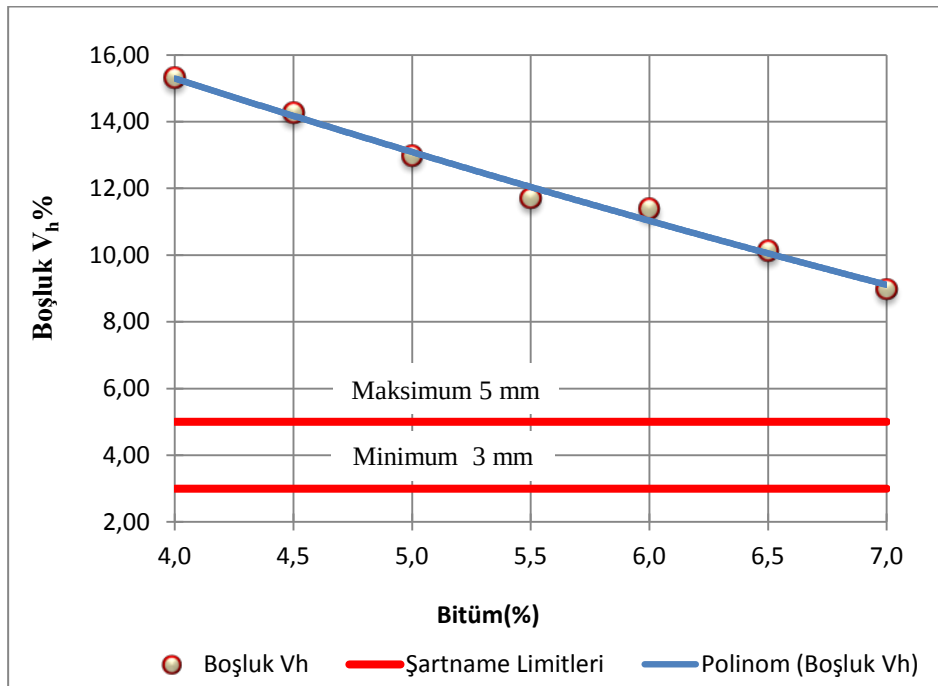
Deney Adı	Birim	Deney Metodu	Sonuç Değer
Penetrasyon (25 °C)	0,1 mm	TS EN 1426	50 - 70
Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	58
Frass Kırılma Noktası	°C	TS EN 12593	Max. -8
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163 °C, 5 Saat) Kütle Değişimi	%	TS EN 12607-2	Max. 0,5
Kalıcı Penetrasyon	%	TS EN 1426	Min. 50
Yumuşama Noktası Yükselmesi	°C	TS EN 1427	Max. 9
Parlama Noktası	°C	TS EN ISO 2592	Min. 230
Çözünürlük	%	TS EN 12592	Min. 99,0
Parafin Mumu İçeriği	%	TS EN 12606-1	Max. 2,2

7.3 Marshall Deneyi Sonuçları

7.3.1 EAF cürufu için grafikler

EAF cürufu için yapılan deneyler sonucu aşınma tabakası için elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Optimum bitüm yüzdesi bu grafikler yardımıyla hesaplanmaktadır. Buna göre, % boşluk - % bitüm, % VMA - % bitüm, % bitümle dolu boşluk (VFB) - % bitüm, pratik özgül ağırlık- % bitüm, stabilite - % bitüm, akma - % bitüm; grafikleri çizilmiştir.

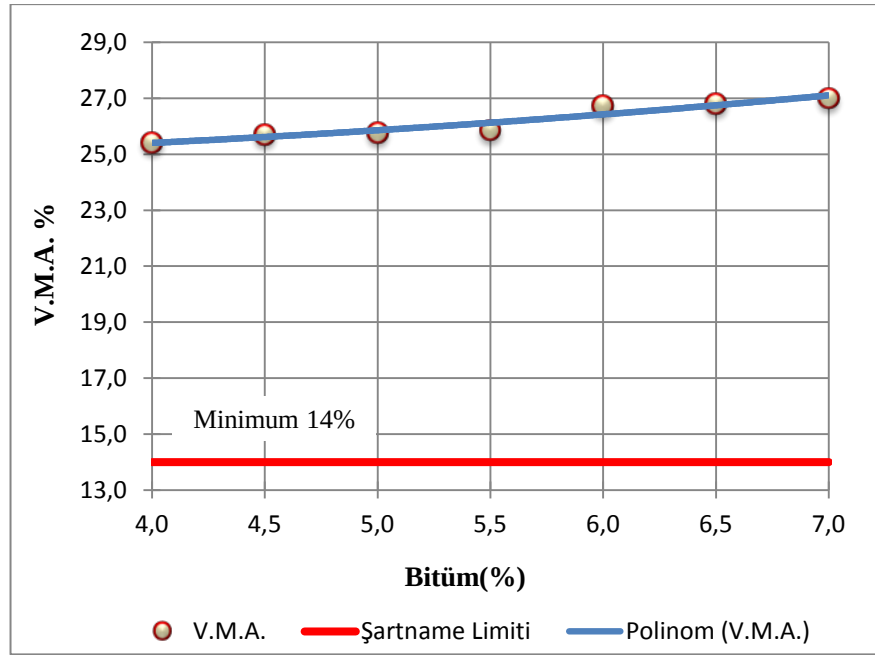
Şekil 7.1'de boşluk oranı (% V_h) - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.1 : Boşluk (% V_h) - bitüm % grafiği.

Agregalar arasındaki boşluk, % boşluk oranı olarak ifade edilmektedir. Artan bitüm miktarı ile boşluklar dolmakta ve boşluk yüzdesi azalmaktadır. Boşluk yol yapımında çatlamalara, akmalara ve su girişine neden olmaktadır. Grafik incelendiğinde, bitüm miktarı arttıkça boşluk oranının azaldığı görülmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre, istenen boşluk oranı oranı %3 ile %5 arasındadır. EAF cürufu için elde edilen grafikte, boşluk yüzdesinin belirlenen limitleri aştığı görülmüştür. Bu da cürufun boşluklu yapısından kaynaklanmaktadır.

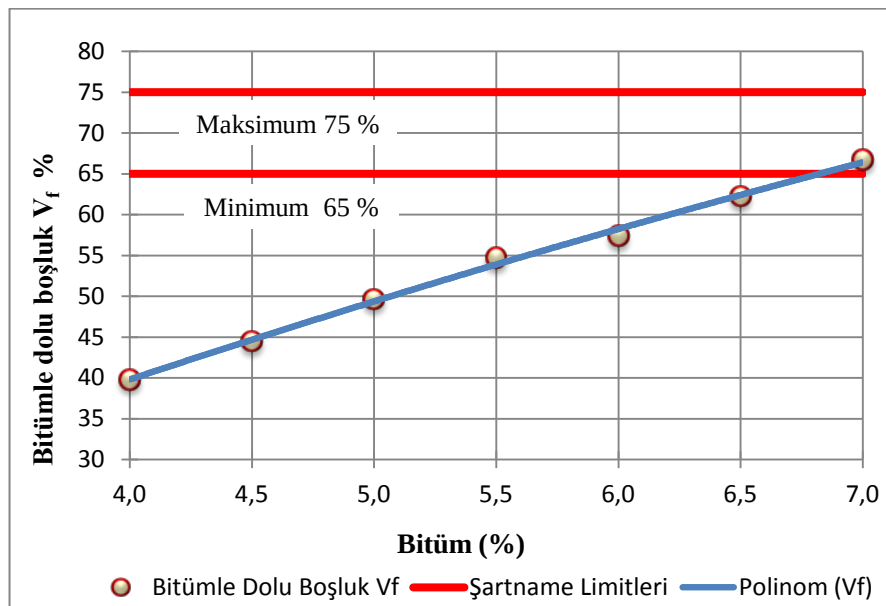
Şekil 7.2'de ise agregalar arasındaki boşluk oranı (%VMA) - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.2 : VMA % - bitüm % grafiği.

VMA sıkışmış durumda karışım içindeki boşlukların katı agregalara göre hacimce oranını ifade etmektedir. Sıkıştırılmış agrega kütlelerinin içindeki boşlukların ve asfalt çimentosunun toplu hacmi, VMA'yı teşkil eder. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre, istenen VMA değeri minimum %14'tür. Elde edilen bu grafiğe göre, deneylerden elde edilen değerler sağlanmaktadır.

Şekil 7.3'te aşınma tabakasının VFB (V_f) % - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.

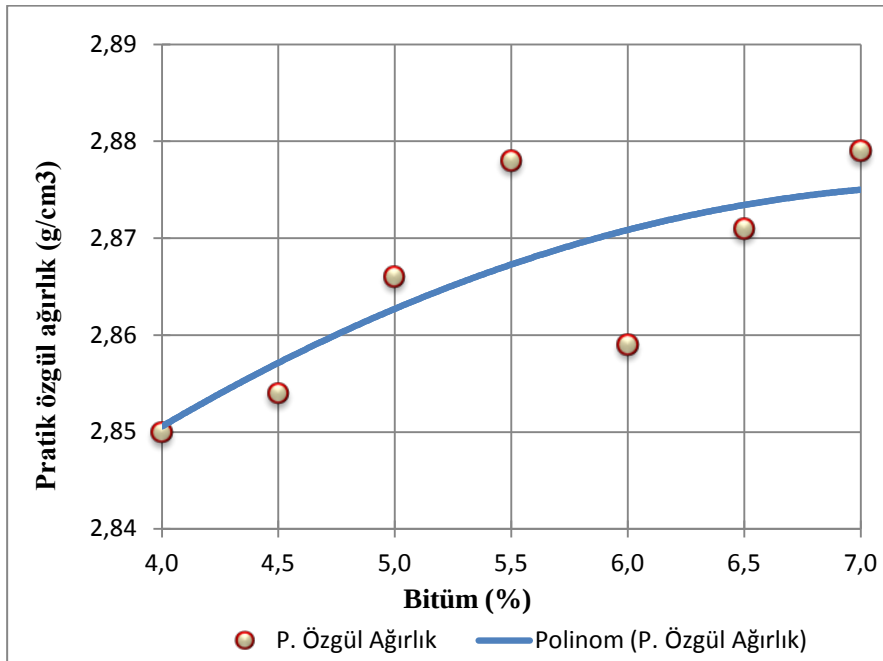


Şekil 7.3 : VFB (V_f) - bitüm % grafiği.

Grafik incelendiğinde, artan bitüm miktarı ile bitümle dolu boşluk oranında artış olduğu gözlenmektedir. Yani, agregalar arasındaki boşluklar bitüm ile dolmaktadır. Bu artış bir süre sonra yavaşlamıştır. Bu durum agrega karışımındaki boşluk oranının azaldığını göstermektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre, belirlenen V_f değeri % 65-75 arasındadır. Elde edilen sonuçlardan, V_f yüzdesinin şartnamede belirtilen limitleri sağladığı görülmüştür.

Bitümle dolu boşluk yüzdesi, şartnamede belirtilen limit değerleri altında ise, agregaları saran asfalt film tabakasının kalınlığı daha azdır. Asfalt film tabakasının kalınlığının az olması nem ve iklim şartlarında agregaların performansının düşmesine neden olur. Limit değeri aşıldığında da durabilite için gerekli olan boşluklar asfaltla dolacaktır. Agregaları saran film tabakası kalınlığı çok ve hava boşluğu düşükse, bu asfaltın kusmasına sebep olmaktadır. Film kalınlığının gerekenden fazla olması, kaplamanın deformasyon direncini azaltacak, film kalınlığı gerekenden az ise, kaplama kırılgan olacaktır [41].

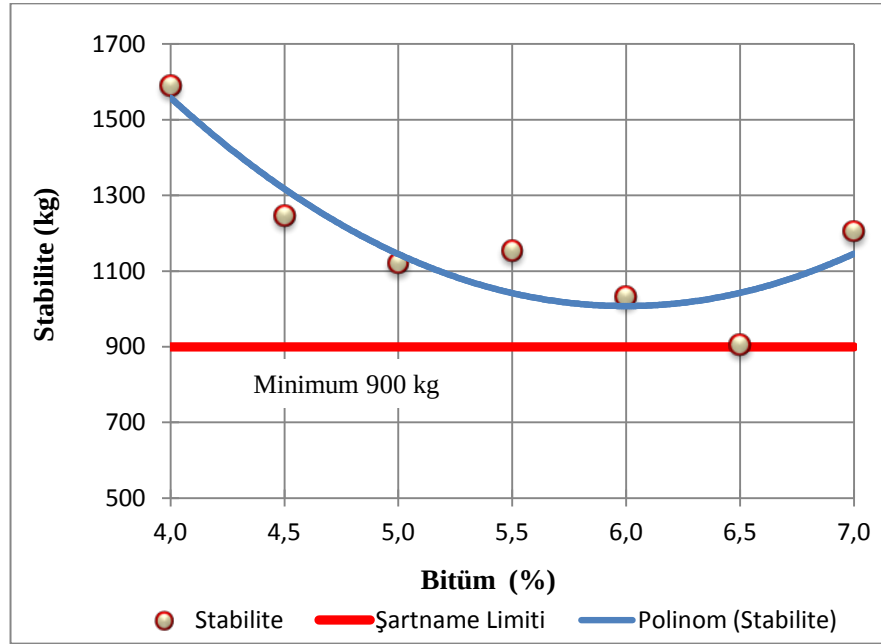
EAF cürufu için bulunan pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı (% bitüm) ilişkisi Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4 : Pratik özgül ağırlık - bitüm % grafiği.

EAF cürufu ile hazırlanan numunelerin yoğunluğu artan bitüm miktarıyla birlikte artış göstermektedir.

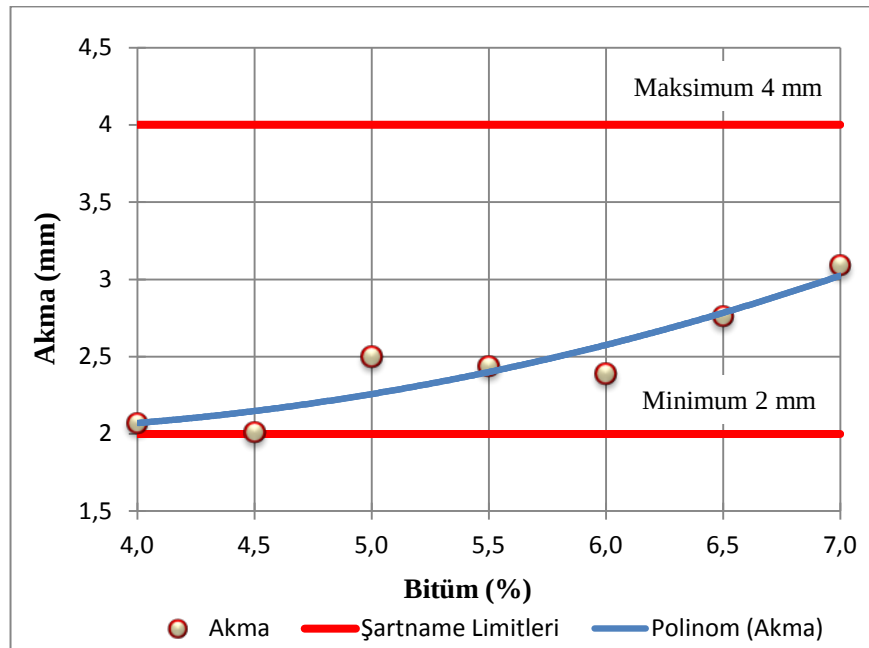
Şekil 7.5'te stabilite ve bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.5 : Stabilite - bitüm % grafiği

Stabilite değeri, sıkıştırılmış bir kaplama karışımının yapısal mukavemetini ifade eder. Bu mukavemete birince derecede asfalt miktarı ile karışımındaki agregaların granülometri ve karakteristiği etki eder. Grafik incelendiğinde, artan bitüm miktarı ile birlikte stabilitenin giderek düştüğü gösterilmektedir.

Şekil 7.6'da akma ve bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.6 : Akma - bitüm % grafiği.

Akma değeri beton asfalt kaplamaların trafik yükleri altındaki davranışlarını belirleyen, beton asfaltların plastiklik ve esneklik özelliklerini temsil eden bir değeridir. Marshall numunelerinin kırıldığı yüke tekabül eden deformasyonunu temsil eden akmanın değeri sıkışmış karışımların iç sürtünmesinin bir ölçüsüdür ve akma değeri ile iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki vardır. Şartnamelerde belirtilen en yüksek akma değeri, karışımın plastikliğini ve kullanılabilecek en yüksek bağlayıcı yüzdesini, en alt değeri ise, karışımın gevrekliğini ve dayanıklılığını kontrol eder [9]. EAF cürufu için elde edilen akma değerleri grafikte görüldüğü gibi şartname limitlerini sağlamıştır.

7.3.2 EAF cürufu için optimum bitüm yüzdesi sonuçları

Elde edilen grafikler sonucunda; optimum bitüm yüzdesi olarak, şartnamede belirtilen hava boşluğu sınırlarının orta noktasına karşılık gelen bitüm içeriğinin seçilmesi önerilir. Bu bitüm yüzdesine karşılık gelen diğer değerler grafiklerden okunur. Okunan bu değerler karışımın tasarlanan kullanım gereklerini karşılıyorsa, bu bitüm oranı “optimum bitüm” olarak seçilir.

Tasarlanan kullanım gereklerine göre, karışımın optimum bitüm miktarı ise, grafiklerde verilen bitüm yüzdelere göre değişen VMA, V_f , V_h ve stabilite için çok düşük, uygun ve çok yüksek bitüm aralıkları tespit edilerek saptanır. Daha sonra, bütün gerekleri sağlayan bitüm aralığı belirlenir ve bu değerlerin ortalaması optimum bitüm içeriği olarak alınır. Bir başka deyişle, grafiklerde verilen kırmızı sınır çizgileri içinde kalan değerlere karşılık gelen bitüm miktarlarının ortalaması alınır. Aşınma tabakası için asfalt betonu bitümlü karışım gerekleri Çizelge 7.7’de verilmiştir [43].

Çizelge 7.7 : Aşınma tabakası asfalt betonu bitümlü karışım gerekleri. [43]

Özellikler	En düşük	En Yüksek
Marshall Stabilesi kg	900	-
Akma, mm (0,25 mm)	2 (8)	4 (14)
Boşluk (V_h) %	3	5
Mineral agregalar arası boşluk (VMA) %	14	-
Bitümle dolu boşluk (VFB) %	65	75

EAF cürufunun boşluklu yapısı sebebiyle, boşluk yüzdesi ve VFB yüzdesi göz önüne alınmadan bitüm değeri hesaplanmıştır. Karışımın tasarlanan kullanım gerekleri doğrultusunda optimum bitüm yüzdesi % 6,3 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre bitümlü karışımın tasarım değerleri şartname limitleriyle kıyaslanarak Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.8 : Optimum bitüme göre bulunan değerler ve limitler.

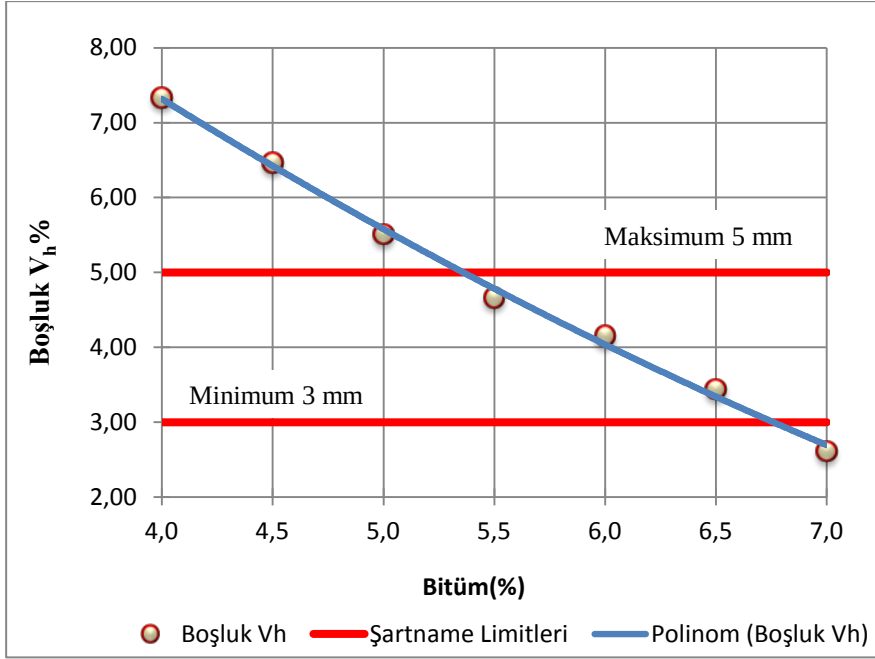
Özellikler	En düşük	En Yüksek	Değer
Bitüm %	4	7	6,3
Marshall Stabilitesi kg	900	-	1025
Akma, mm (0,25 mm)	2 (8)	4 (14)	2,7
Boşluk (V_h) %	3	5	10,46
Mineral agregalar arası boşluk (VMA) %	14	-	26,5
Bitümle dolu boşluk (VFB) %	65	75	61,4

7.3.3 Doğal agregaya için grafikler

Doğal agregaya için yapılan deneyler sonucunda aşınma tabakası için elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Optimum bitüm yüzdesi bu grafikler yardımıyla hesaplanmaktadır. Buna göre, % boşluk - % bitüm, % VMA - % bitüm, % bitümle dolu boşluk (VFB) - % bitüm, pratik özgül ağırlık- % bitüm, stabilite - % bitüm, akma - % bitüm; grafikleri çizilmiştir.

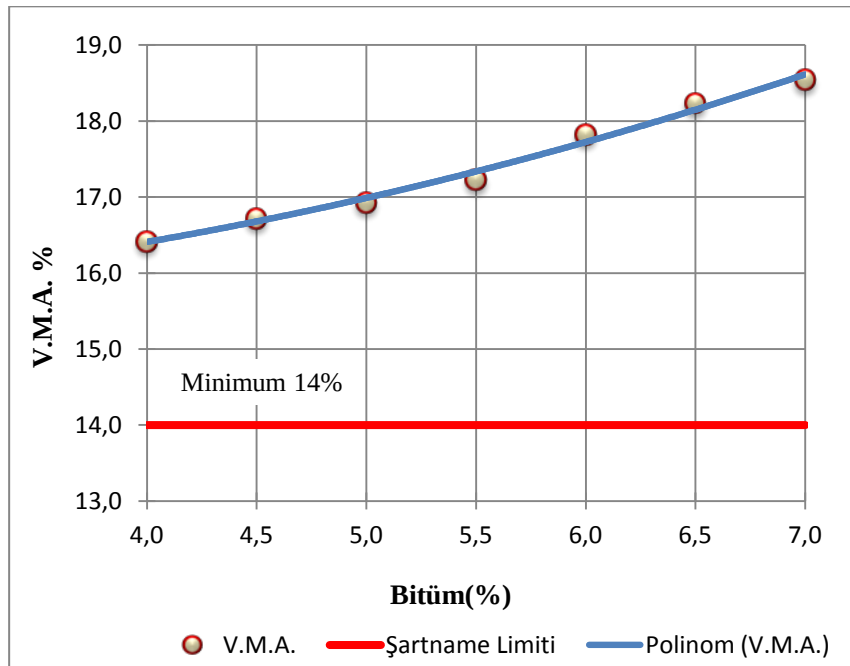
Şekil 7.7'de boşluk (V_h) % - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.

Doğal agregaya için yapılan deneyler sonucunda elde edilen boşluk oranı grafiğine göre, şartname limitleri % 5,3 ile %6,8 bitüm oranları arasında sağlanmaktadır.



Şekil 7.7 : Boşluk (V_h) - bitüm % grafiği.

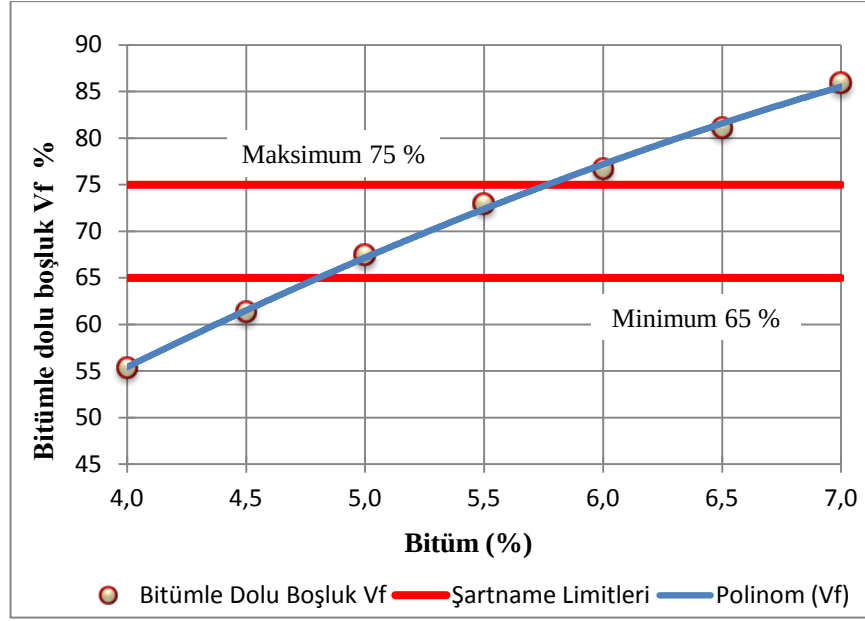
Şekil 7.8'de ise VMA - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.8 : VMA - bitüm % grafiği.

Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre istenen VMA değeri minimum %14' tür. Elde edilen bu grafiğe göre değerler sağlanmaktadır.

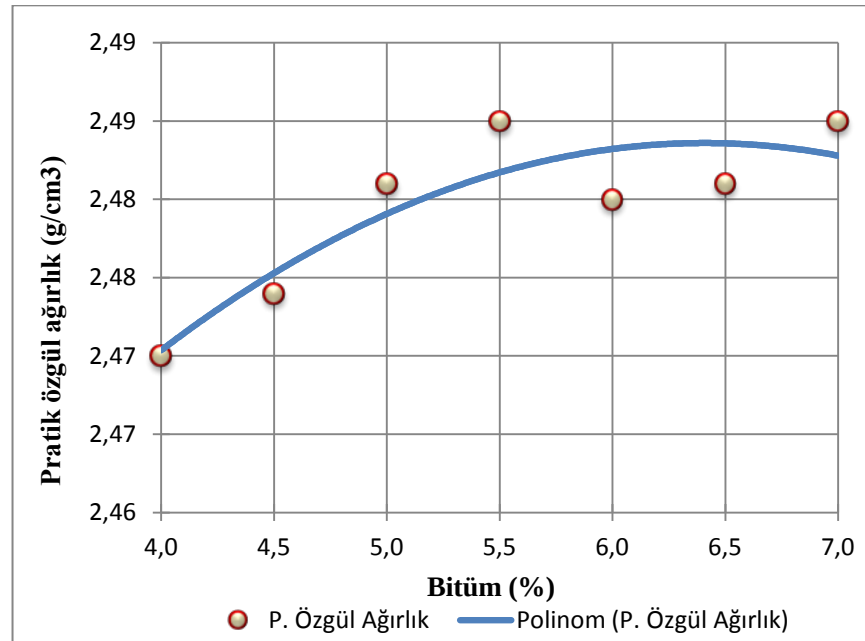
Şekil 7.9'da aşınma tabakasının bitümle dolu boşluk (VFB) - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.9 : VFB (V_f) - bitüm % grafiği.

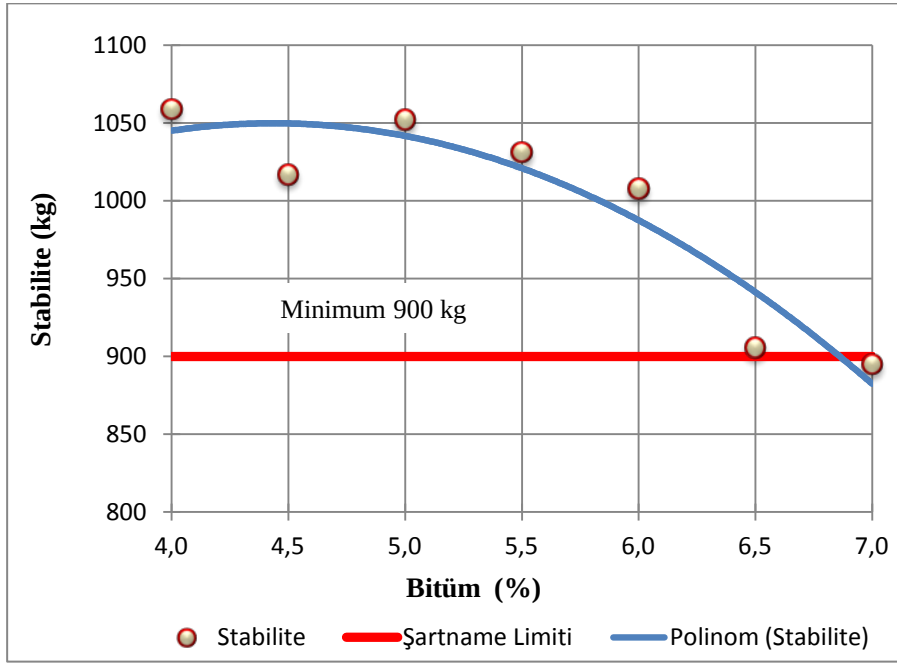
Grafik incelendiğinde, artan bitüm miktarı ile bitümle dolu boşluk oranında artış olduğu gözlenmektedir. Yani, agregalar arasındaki boşluklar bitüm ile dolmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre belirlenen V_f değeri 65-75 arasındadır. Elde edilen sonuçlarda V_f yüzdesinin şartnamede belirtilen limitleri sağladığı gözlenmiştir.

Doğal agregalar için pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı (% bitüm) ilişkisi Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10 : Pratik özgül ağırlık - bitüm % grafiği.

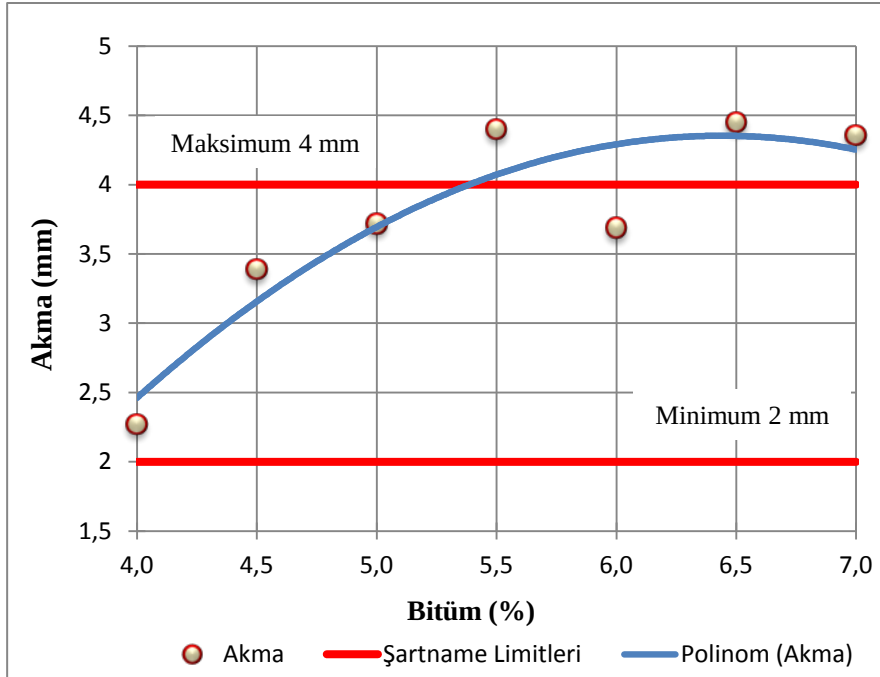
Şekil 7.11'de stabilite – bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.11 : Stabilite - bitüm % grafiği.

Grafik incelendiğinde, artan bitüm miktarı ile birlikte stabilitede giderek düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 7.12'de akma - bitüm oranı (% bitüm) grafiği verilmiştir.



Şekil 7.12 : Akma - bitüm % grafiği.

Doğal agregada için elde edilen grafikte görüldüğü gibi, bulunan değerler %4 ile %5,4 arasındaki bitüm yüzdeleri için şartname limitlerini sağlamıştır.

7.3.4 Doğal agregada için optimum bitüm yüzdesi sonuçları

Optimum bitüm yüzdesi hesabı Bölüm 7.3.2'de açıklanmıştır.

Doğal agregada için karışımın tasarlanan kullanım gerekleri doğrultusunda optimum bitüm yüzdesi % 5,4 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre, bitümlü karışımın tasarım değerleri şartname limitleriyle kıyaslanarak Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9 : Optimum bitüme göre bulunan değerler ve limitler.

Özellikler	En düşük	En Yüksek	Değer
Bitüm %	4	7	5,4
Marshall Stabilesi kg	900	-	1028,7
Akma, mm (0,25 mm)	2 (8)	4 (14)	3,9
Boşluk (V_h) %	3	5	4,9
Mineral agregalar arası boşluk (VMA) %	14	-	17,3
Bitümle dolu boşluk (VFB) %	65	75	72,8

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada Kocaeli'de bulunan Çolakoğlu Metalurji A.Ş. tesislerinden alınan EAF cüruflarının, esnek yol üstyapılarının aşınma tabakasında agrega olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. EAF cürufunun özellikleri Karayolları Teknik Şartnamesi 2006'da belirtilen standartlara uygun deneyler yapılarak belirlenmiştir. Aşınma tabakasında agrega olarak kullanımına yönelik olarak Marshall tasarımı yapılmıştır. Aynı deneyler halihazırda kullanılan doğal agregaya da uygulanarak kıyaslama yapılmıştır. Uygulanan tüm deneyler Karayolları Teknik Şartnamesi'ne ve standartlara uygun olarak aşınma tabakası limitlerine göre yapılmıştır.

Aşınma tabakasında kullanılacak agregaların fiziksel özellikler bakımından diğer tabakalarda kullanılacak agregalara nazaran üstün olması gerekirken bitümlü temel ve binder tabakalarındaki agregaların fiziksel özelliklerinin aşınma tabakasındaki kadar iyi olması gerekmemektedir.

- Yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonucuna göre, doğal agreganın aşınma değeri % 19,28 bulunurken, EAF cürufu için bu değer % 21 hesaplanmıştır. Şartnamede aşınma tabakası için bu değer maksimum % 30 olması istenmekte, bu bakımdan bu iki değer şartname limitini sağlamaktadır.
- Yassı ve silindirik tanelerin çekme dayanımları düşük olduğu için, bunlar asfalt betonu içinde zayıf bölgeler oluşturarak üst yapıda hasarın oluşmasına neden olabilir. Yassı tane miktarı sıkışma ve aşınma direncine dayanım açısından da önem arz eder. EAF cürufuna uygulanan yassılık indeksi deneyi sonucunda elde edilen değer % 8' dir. Şartnamede aşınma tabakası için bu değer maksimum % 30 olması istenmekte, bulunan değer şartname limitini sağlamaktadır. Yapılan korelasyonlar yassı tane indeksinin aşınma gibi bazı fiziksel özellikleri, doğru orantılı olarak etkilediğini göstermiştir. Dolayısıyla, agrega özelliklerini etkileyen yassı tane miktarı kompozit malzemenin ömrü açısından da önem taşımaktadır.

- Karışımların kohezyonu ve stabiliteleri açısından önemli bir özellik de agrega-bitüm adezyonunun tespit edilmesidir. Soyulma deneyi olarak adlandırılan bu deney sonucuna göre EAF cürufu için katkı kullanılmadan bulunan soyulma mukavemeti değeri %60-70 arasında bulunmuştur. Mukavemet artırıcı katkı kullanılarak bulunan değer ise % 90-100'dür. EAF cürufunun her iki şekilde de şartnamede verilen % 50 değerini aştığı görülmüştür.
- Agregalara uygulanan diğer önemli bir deney cilalanma deneyidir. EAF cürufuna uygulanan cilalanma deneyi sonucunda cilalanma değeri 66,4 bulunmuştur. Şartnamede aşınma tabakası için bu değer minimum 50 olması istenmektedir. Bulunan değer şartname limitlerini sağlamaktadır.
- Yol kaplamalarında kullanılacak agregalarda aranan önemli özelliklerden biride su emme miktarıdır. EAF cürufu % 3,69 su emme yüzdesiyle poroz bir yapıya sahiptir. Doğal agregada ise 0,28 bulunmuştur.
- Doğal agregaya uygulanan Marshall deneyi sonuçları Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 : Doğal agrega için Marshall deneyi sonuçları.

Dizayn Parametreleri	Optimum Bitüm %	Değer	Şartname Aralığı
Pratik Özgül Ağırlık gr/cm ³	5,4	2,484	
Marshall Stabilesi kg	5,4	1028,7	900 -
Bitümle dolu boşluk (VFB) %	5,4	72,8	65 - 75
Boşluk (V _h) %	5,4	4,9	3 - 5
Mineral agregalar arası boşluk (VMA) %	5,4	17,3	14 -
Akma (mm)	5,4	3,9	2 - 4

- EAF cürufuna uygulanan Marshall deneyi sonuçları Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2 : EAF cürufu için Marshall deneyi sonuçları.

Dizayn Parametreleri	Optimum Bitüm %	Değer	Şartname Aralığı
Pratik Özgül Ağırlık gr/cm ³	6,3	2,873	-
Marshall Stabilesi kg	6,3	1025	900 -
Bitümle dolu boşluk (VFB) %	6,3	61,4	65 - 75
Boşluk (V _h) %	6,3	10,46	3 - 5
Mineral agregalar arası boşluk (VMA) %	6,3	26,5	14 -
Akma (mm)	6,3	2,7	2 - 4

- Marshall yöntemi ile tasarım için yapılan deney sonuçlarına göre stabilize değerinin doğal agregada bitüm yüzdesi artışına bağlı olarak azaldığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak da akmanın arttığı görülmüştür. Ayrıca, şartnamede verilen akma sınır değerini % 5,5 bitüm oranından sonra aştığı görülmüştür.
- EAF cürufu için yapılan deney sonuçlarında ise stabilitenin bitüm oranına göre kararsız bir dağılım gösterdiği bulunmuştur. EAF cürufunun stabilize açısından şartname limitlerini sağladığı ve akma değerinin ise, şartname sınırları içinde yer aldığı görülmüştür. EAF cürufunun stabilize ve akma koşullarını yerine getirme açısından doğal agregaya oranla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- VFB oranının artan bitüm yüzdesi ile arttığı gözlenmiştir. Yani agregalar arası boşluklar bitüm ile dolmaktadır. Agregalar arasındaki bu boşluklar yeterince dolmadığı zaman yağmur suyu ve istenmeyen maddelerle dolmakta bu da yolda çatlamalara ve çökmelere sebebiyet vermektedir. Yapılan bu deney sonucunda doğal agregaya için VFB %' sinin şartname sınırları içerisinde kaldığı gözlemlenirken, EAF cürufu için bu değer şartname sınırları altında kaldığı gözlemlenmiştir.

EAF cürufunun poroz yapısı nedeniyle boşlukların şartname limitlerinin üstünde kaldığı tespit edilmiştir. Boşluk yüzdesinin fazla olması sebebiyle EAF cürufu ile imal edilecek aşınma tabakasının geçirimli olabileceği öngörülmüştür. Aşağıda, bu durumun etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla alınabilecek bazı

önlemler sıralanmıştır. Ayrıca, EAF cürufunun kullanımıyla ilgili bazı öneriler sunulmuştur.

- Eğer binder tabakası EAF cürufu ile imal edilecekse, binder ile temel arasında atılan astarın tam geçirimsizlik şartını sağlaması gerektiği söylenebilir. Bu şekilde aşınma tabakasındaki porozitenin etkisi en aza indirilmiş olur.
- Ayrıca, binder tabakasını doğal agregayla imal ederek aşınma tabakasında oluşacak porozitenin etkisi en aza indirilebilir.
- EAF cürufu, poroz asfalt yapımında da kullanılabilir. Geçirimli asfalt kaplamalar (poroz asfalt) geçirimsiz olarak inşa edilen diğer esnek kaplama tiplerinin aksine, yüksek boşluk oranında (min. %15) tasarlanan ve genellikle geçirimsiz bir tabaka üzerine inşa edilir. Bu kaplamalar, yol yüzeyinde suyun birikmesini önleyerek sürtünme-kayma direncinin artmasını ve kızaklanmanın azalmasını sağlayarak, sürüş güvenliğini artırmakta ve kaza riskini büyük oranda azaltmaktadır. Poroz asfaltın bir diğer avantajı da yuvarlanma gürültüsünü önemli ölçüde azaltmasıdır.
- EAF cürufu atık olarak stoklanmakta olan bir malzemedir. Henüz bir ürün sınıfında değildir. Dolayısıyla, bu çalışmada agregalar, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakası için verilen Tip-1 granülometrisinin ortalamasına göre hazırlanmıştır. Eğer, cürufa özel bir granülometri sağlanırsa, kaplamada oluşacak boşluk miktarı azaltılabilir.

EAF cürufunun cilalanmaya karşı direncinin yüksek olması sebebiyle, alınabilecek diğer önlemlerle aşınma tabakasında kullanılması önerilmektedir.

Tespit edilen optimum bitüm yüzdesi kullanılarak EAF cürufu ile yapılan asfalt kaplamalarının güvenlik ve kullanımının ASTM standartları baz alınarak yapılan deneylerle uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Nem, sıcaklık gibi etkilerin bitüm yüzdesini etkileyeceği gerekçesiyle bu deneyler yapılırken bölgenin iklim koşullarının, jeolojisinin ve topoğrafyasının iyi etüdü edilmesi önerilir.

2012 yılında Türkiye'de üretilen çelik miktarı 35,9 milyon tondur. 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 120-150 kg cüruf açığa çıktığı göz önüne alındığında, 2012 yılında yaklaşık 4,8 milyon ton cüruf açığa çıkmıştır. Bunun da yaklaşık 3,6 milyon

tonu EAF cürufudur. Atıl olarak bekleyen bu ürünler agrega olarak değerlendirilerek hem ekonomiye kazandırılmış olacak hem de alternatif ve ekonomik bir agrega kaynağı elde edilecektir.

Bu atıkların kullanımının yaygınlaştırılması için yasal bir düzenleme gerekmektedir. Teşvik edici yasal düzenlemelerle ülkemizde ortaya çıkan atıkların daha fazla katma değer yaratacak şekilde kullanım imkanları ortaya çıkacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ertürk, H.** (1996). *Çevre Bilimlerine Giriş*, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayın No:10, ISBN: 975-564-028-2, Bursa.
- [2] **Sönmez, İ.** (2013). Asfaltta geri dönüşüm ve geri dönüşüm sistemleri-I. *Yol Teknolojileri*, 21, 94-96.
- [3] **Arıoğlu, E.** (2003). *Agrega Sektörüne Genel Bakış: Değerlendirme-Öneriler*, *Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul.
- [4] **Bilen, M.** (2010). *Çelikhane Curuflarından Liç-Karbonatlaştırma Prosesi İle Kalsiyum Karbonat Kazanılması* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [5] **Ilıcalı, M.** (1988). *Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanabilirliğinin Araştırılması* (Doktora Tezi). YTÜ, İstanbul.
- [6] **Tunç, A.** (2007). *Yol malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul.
- [7] **Ağar, E., Sutas, İ. ve Öztaş, G.** (1998). *Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları)*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [8] **Lav, A. H.** (2013). *Mekanistik-Ampirik Beton Yol Tasarımı İçin Gerekli Temel Bilgiler*, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, İstanbul.
- [9] **Umar, F. ve Ağar, E.** (1985). *Yol Üstyapısı*. İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [10] **Çağlar, A. G.** (2007). *Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, İstanbul.
- [11] **Dündar, G.** (1998). *Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, İstanbul.
- [12] **TS EN 12591**, 2011. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Kaplama sınıfı bitümler-Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [13] **ACMA** (Product Group of the British Aggregate Construction Materials Industries). (1992). *Bituminous Mixes and Flexible Pavements*, London
- [14] **Karayolları Teknik Şartnamesi.** (2006). *KGM Yayını*, Ankara.
- [15] **Akman, E.** *Dünya' da ve Türkiye' de Demir Çelik Sektörü ve Türk Demir Çelik Sektörünün Rekabet Gücü.* (Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak
- [16] **International Iron and Steel Institute.** Alındığı tarih: 16.08.2013. Adres: www.worldsteel.org
- [17] **Demir-Çelik Üretimi.** (t.y). *Endüstri Mühendisliği Ders Notları*, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

- [18] **DÇÜD.** (2013). *Türk Demir Çelik Sektörü*. Eylül 2013 tarihinde Demir Çelik Üreticileri Derneği: <http://www.dcud.org.tr> adresinden alındı
- [19] **Dündar, H.** (2006). *Farklı Soğutma Hızlarında Soğutulan Çelikhane Cüruflarının Öğütme Parametrelerinin İncelenmesi*. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [20] **Yıldız, K.** (2013). *Ham Demirden Çelik Üretimi*. Demir Çelik Metalurjisi Ders Notları . Sakarya Üniversitesi, Sakarya
- [21] **European Commission.** (2001). *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel*. Sevilla, Spain: Expo-WTC
- [22] **Euroslag.** (2008). *Production and Use Statistics of Slag*. Alındığı tarih: 01.03.2012. Adres: www.euroslag.org/products/statistics/2008/
- [23] **Yılmaz, A.** (2008). *Ferrokrom ve Silikoferrokrom Cürufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi* (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [24] **Kara, M., Günay, E., Sönmez, B., Baş, E.** (2001). *Çelikhane Cüruflarının Asfalt Betonu Agregası ve Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Kullanılması İmkânları*. Tübitak-Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli.
- [25] **Barka, E.** (2008). *Demir Çelik ve Gemi Söküm Tesislerinin Çevresel Etkileri*, TMMOB İzmir Kent Sempozyumu
- [26] **Ata, M.M.** (1987). *Esnek Üstyapıların Projelendirme ve İnşaat Yöntemlerinin Araştırılması ve Cüruflu Asfalt Betonu*, (Yüksek Lisans Tezi). YTÜ.
- [27] **Noureldin, A.S. and McDaniel, R.S.** (1990). Evaluation of Surfaces Mixtures of Steel Slag and Asphalt, *Transportation Research Record* 1296
- [28] **ASA (Australasian Slag Association).** (1993). *Road & Traffic Authority. A Guide to the Use of Slag in Roads*. Australia
- [29] **Özmen, A., Ertem, E., Kes, K., Karakaya, B.** (2008). Küresel Isınma ve Kyoto Protokolünün Değerlendirilmesi. Adres: emre.ertem.googlepages.com.
- [30] **Ahmed, I.** (1993). *Use of Waste Materials in Highway Construction*, Purdue University, Noyes Data Corporation.
- [31] **Tosun, N.** (t.y.). *Bitümlü Kaplamalar Uygulama Kitabı*. Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü. Bursa
- [32] **TS EN 933-1:2012(EN)**, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [33] **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.
- [34] **ASTM C127**, 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.

- [35] **ASTM C128**, 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [36] **TS EN 1097-2**, 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [37] **TS EN 933-3**, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 3: Tane şekli tayini yassılık endeksi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [38] **TS EN 1097-8**, 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 8: Taş parlatma değerinin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [39] **TS EN 1744-1:2009+A1**, 2013. Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler Bölüm 1: Kimyasal analiz, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [40] **ASTM D5-97**, 1997. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [41] **Öksüz, B.** (2011). *Asfalt Betonlu Kaplamalarda Volkanik Cüruf Ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [42] **ASTM D70-03**, 2003. Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [43] **TS 3720**, 2010. Bitümlü karışımlar - Asfalt betonu - Karışım tasarımı hesap esasları - Marshall yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [44] **ASTM D6927-06**, 2006. Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [45] **Orhan, F.** (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü. Ankara
- [46] **ASTM D2041/D2041M-11**, 2011. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, *American Society for Testing and Materials*, ABD.

EKLER

Briket No	Bitüm Yüzdesi		Briket Yüksekliği	Havadaki Ağırlık	Sudaki Ağırlık	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık	Hacim	Pratik Özgül Ağırlık	Max. Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk	Akma	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite
	W _a	gr	Ort.	gr (A)	gr (C)	gr (B)	cm ³ V (B-C)	D _p	D _T	V _h	VMA	V _f	mm	kg		
1	4	52,1	50,3	1125,1	741,3	1127,4	386,1	2,914	3,365	15,31	25,42	39,76	1,84	1146	1,498	1717,0
2		52,1	54,3	1239,6	798	1241,8	443,8	2,793					1,97	1216,5	1,307	1590,0
3		52,1	56	1246,2	812,6	1251,1	438,5	2,842					2,41	1185,3	1,235	1463,8
								2,850					2,07	1182,7		1590,3
4	4,5	58,6	55	1117,8	725	1122,1	397,1	2,815	3,329	14,27	25,70	44,47	1,99	755,5	1,276	964,0
5		58,6	53,8	1211,8	793	1214,3	421,3	2,876					2,11	1003	1,329	1333,0
6		58,6	59	1353,3	885,2	1356,8	471,6	2,870					1,93	1276,5	1,131	1443,7
								2,854					2,01	1011,7		1246,9
7	5	65,1	56	1284,6	838,7	1287,8	449,1	2,860	3,294	12,98	25,76	49,64	2,86	979,5	1,235	1209,7
8		65,1	57,2	1283,4	838,9	1285,5	446,6	2,874					1,71	937,8	1,19	1116,0
9		65,1	51,2	1146,5	750,2	1150,4	400,2	2,865					2,92	716,3	1,45	1038,6
								2,866					2,50	877,9		1121,4
10	5,5	71,6	56,6	1305,7	855,5	1307	451,5	2,892	3,260	11,72	25,86	54,68	2,5	924,8	1,213	1121,8
11		71,6	51,3	1195,4	782,5	1197,6	415,1	2,880					2,35	833,6	1,442	1202,1
12		71,6	59,7	1386,5	904,3	1388,9	484,6	2,861					2,44	1029	1,109	1141,2
								2,878					2,44	929,1		1155,0
13	6	78,1	55,8	1285,3	835,5	1288,7	453,2	2,836	3,227	11,39	26,73	57,38	2,37	838,8	1,243	1042,6
14		78,1	54,1	1275,1	833	1279,4	446,4	2,856					2,86	870	1,324	1151,9
15		78,1	56,6	1279,2	838,9	1282,3	443,4	2,885					1,93	746	1,213	904,9
								2,859					2,39	818,3		1033,1
16	6,5	84,6	62	1343	879,7	1347	467,3	2,874	3,195	10,13	26,81	62,23	3,47	890,9	1,038	924,8
17		84,6	61	1292,1	849,1	1296,5	447,4	2,888					2,44	810,2	1,068	865,3
18		84,6	44,2	997,7	650,9	1000,8	349,9	2,851					2,36	478,6	1,94	928,5
								2,871					2,76	726,6		906,2
19	7	91,1	61,7	1450	953	1452,4	499,4	2,903	3,164	8,98	27,00	66,72	3,05	1204,4	1,046	1259,8
20		91,1	61,4	1446,5	946,8	1448,7	501,9	2,882					3,11	1226,5	1,056	1295,2
21		91,1	42,4	962,4	627,4	964,8	337,4	2,852					3,11	496,8	2,139	1062,7
								2,879					3,09	975,9		1205,9

Ek.1 Aşınma tabakası için EAF cürufundan elde edilen veri çizelgesi.

Briket No	Bitüm Yüzdesi		Briket Yüksekliği	Havadaki Ağırlık	Sudaki Ağırlık	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık	Hacim	Pratik Özgül Ağırlık	Max. Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk	Akma	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite
	W _a	gr	Ort.	gr (A)	gr (C)	gr (B)	cm ³ V (B-C)	D _p	D _T	V _h	VMA	V _f	mm	kg		
1	4	52,1	71,3	1375,3	814	1377,1	563,1	2,442	2,665	7,33	16,42	55,37	2,6	1263,4	0,829	1047,4
2		52,1	62,3	1197,9	719,6	1201,5	481,9	2,486					1,65	880,1	1,03	906,5
3		52,1	60,4	1195,9	715,4	1197,3	481,9	2,482					2,55	1125,4	1,087	1223,3
								2,470					2,27	1089,64		1059,1
4	4,5	58,6	57,6	1072,8	640,2	1072,2	432	2,483	2,645	6,47	16,72	61,32	3,11	908,5	1,177	1069,3
5		58,6	69,3	1201	717,5	1203,6	486,1	2,471					3,76	1136,7	0,87	988,9
6		58,6	61,1	1064,8	634,3	1065,7	431,4	2,468					3,3	932,8	1,065	993,4
								2,474					3,39	992,7		1017,2
7	5	65,1	72,9	1245,5	745,4	1247,3	501,9	2,482	2,626	5,51	16,93	67,45	3,93	1152,6	0,811	934,8
8		65,1	62,2	1135,7	678,3	1138,9	460,6	2,466					3,68	1050,8	1,033	1085,5
9		65,1	62,1	1115,4	673,5	1120,5	447	2,495					3,56	1098	1,035	1136,4
								2,481					3,72	1100,5		1052,2
10	5,5	71,6	67,3	1332,9	776,1	1333,7	557,6	2,390	2,606	4,66	17,23	72,96	4,7	1125,4	0,915	1029,7
11		71,6	63,5	1256,3	764,6	1258,4	493,8	2,544					3,72	948,2	1,0	948,2
12		71,6	63,2	1269,2	767,6	1271,2	503,6	2,520					4,79	1107,1	1,008	1116,0
								2,485					4,40	1060,2		1031,3
13	6	78,1	68,9	1399,6	828	1400,8	572,8	2,443	2,588	4,15	17,82	76,69	4,38	1288,5	0,878	1131,3
14		78,1	59,2	1172,7	704	1174	470	2,495					3,59	803,6	1,124	903,2
15		78,1	62,8	1259,7	757,8	1261,3	503,5	2,502					3,11	971,7	1,018	989,2
								2,480					3,69	1021,3		1007,9
16	6,5	84,6	64,5	1297,8	775,8	1300,5	524,7	2,473	2,569	3,44	18,24	81,12	4,15	950,8	0,95	903,3
17		84,6	61	1185,7	712,7	1187,2	474,5	2,499					4,32	846,1	1,068	903,6
18		84,6	68,7	1362,2	814,2	1365,6	551,4	2,470					4,89	1034,2	0,88	910,1
								2,481					4,45	943,7		905,7
19	7	91,1	73	1458,2	874,9	1460,4	585,5	2,491	2,550	2,61	18,54	85,91	4,57	1111,9	0,81	900,6
20		91,1	62,2	1246,1	746,4	1248,7	502,3	2,481					4,38	841,2	1,033	869,0
21		91,1	56,6	1125,4	672,8	1126	453,2	2,483					4,13	754,8	1,213	915,6
								2,485					4,36	902,6		895,1

Ek.2 Aşınma tabakası için doğal agregadan elde edilen veri çizelgesi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet Ozan KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul - 05.07.1988

**Adres: Tefikbey Mah. Maslak Çeşme Cad. Halkbankası Konutları D Blok D17
Sefaköy/K.çekmece/İstanbul**

E-Posta: ozankaya7@gmail.com

Lisans: İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği