

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK
ÜSTYAPILARDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI GRANÜLER TEMEL
TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Irmak Sema SEREN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK
ÜSTYAPILARDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI GRANÜLER TEMEL
TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Irmak Sema SEREN
(501121410)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Şükrüye İYİNAM

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121410 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Irmak Sema SEREN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK ÜSTYAPILARDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI GRANÜLER TEMEL TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN**
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Murat ERGÜN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2015**

Sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Böyle bir çalışmaya yönelmemi sağlayan, çalışmam boyunca yardımları ile bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Şükrüye İYİNAM'a teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda beni yönlendiren ve çalışmamın ilerlemesinde emekleri bulunan İnşaat Yüksek Mühendisi Fatih YONAR'a teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyen aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mayıs 2015

Irmak Sema SEREN
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. ESNEK ÜSTYAPILAR	3
2.1. Taban Zemini	3
2.2. Alt Temel Tabakası	4
2.3. Temel Tabakası	4
2.3.1. Granüler Temel (GT) tabakası	5
2.3.2. Plent-Miks Temel (PMT) tabakası.....	5
2.3.3. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakası	5
2.4. Bitümlü Karışım Tabakaları	5
2.4.1. Bitümlü temel tabakası.....	6
2.4.2. Kaplama tabakası	6
3. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ	7
3.1. Demir Çelik Sektörü.....	7
3.2. Demir Çelik Üretimi.....	9
3.2.1. Yüksek Fırınlr (YF).....	10
3.2.2. Bazik Oksijen Fırını (BOF).....	12
3.2.3. Elektrik Ark Fırını (EAF)	13
4. CÜRUF OLUŞUMU, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLRI.....	17
4.1. Cüruf Oluşumu	17
4.1.1. Yüksek Fırın (YF) cürufu	17
4.1.2. Çelikhane cürufları.....	19
4.1.2.1. Bazik Oksijen Fırını (BOF) cürufu	20
4.1.2.2. Elektrik Ark Fırını (EAF) cürufu	21
4.1.2.3. Pota ocağı cürufu	22
4.2. Cürufların Kullanım Alanları	22
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
5.1. Karayolu Teknik Şartnamesine Göre Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) Tabakasının Özellikleri	27
5.1.1. Malzeme özellikleri.....	27
5.1.2. Karışım oranları	29
5.1.3. Karıştırma.....	29
5.2. Uygulanan Deneyler.....	30
5.2.1. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneyler	30
5.2.1.1. Özgül ağırlık ve su emme (absorpsiyonu) deneyi.....	30

5.2.1.2. Los Angeles aşınma deneyi.....	33
5.2.1.3. Yassılık indeksi deneyi.....	34
5.2.1.4. Organik madde içeriği deneyi	35
5.2.1.5. Metilen mavisi deneyi	36
5.2.1.6. Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi.....	38
5.2.1.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi	39
5.2.1.8. Likit limit ve plastik limit deneyi.....	41
5.2.2. Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasına uygulanan deneyler	41
5.2.2.1. Modifiye proktor deneyi	42
5.2.2.2. CBR deneyi (Kaliforniya taşıma oranı)	43
5.2.2.3. Serbest basınç dayanımı (tek eksenli basınç) deneyi	44
5.3. DeneySEL Bulgular	47
5.3.1. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneylerin sonuçları	47
5.3.1.1. Özgöl ağırlık ve su emme (absorpsiyonu) deneyi sonuçları	47
5.3.1.2. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları	48
5.3.1.3. Yassılık indeksi deneyi sonuçları.....	49
5.3.1.4. Organik madde içeriği deneyi sonuçları.....	49
5.3.1.5. Metilen mavisi deneyi sonuçları	50
5.3.1.6. Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi sonuçları	51
5.3.1.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi sonuçları.....	51
5.3.1.8. Likit limit ve plastik limit deneyi sonuçları	52
5.3.2. Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasına uygulanan deneylerin sonuçları	52
5.3.2.1. Modifiye proktor deneyi sonuçları.....	53
5.3.2.2. CBR deneyi (Kaliforniya taşıma oranı) sonuçları.....	58
5.3.2.3. Serbest basınç dayanımı (tek eksenli basınç) deneyi sonuçları.....	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	75

KISALTMALAR

EAF	: Elektrik Ark Fırını
ÇBGT	: Çimento Bağlayıcı Granüler Temel
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
GT	: Granüler Temel
PMT	: Plent-Miks Temel
YF	: Yüksek Fırın
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
OHL	: Siemens-Martini Fırını
CBR	: Kaliforniya Taşıma Gücü
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
KBHA	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
MKBHA	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
W	: Su Muhtevası

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yıllara göre ham çelik üretimi.....	8
Çizelge 3.2 : Ham çelik üretimindeki 15 ülke	8
Çizelge 4.1 : EAF cürufunu oluşturan bileşikler	21
Çizelge 5.1 : ÇBGT tabakası granülometri limitleri.....	28
Çizelge 5.2 : Kaba agreganın fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 5.3 : İnce agreganın fiziksel özellikleri	28
Çizelge 5.4 : Sülfat içeriğine bağlı olarak kullanılacak çimento tipleri	29
Çizelge 5.5 : Numune tane boyutlarına karşılık gelen elek boyutları.....	39
Çizelge 5.6 : Yürürlükten kalkan çimento türleri	45
Çizelge 5.7 : Sülfata dayanıklı çimento ailesi	45
Çizelge 5.8 : Özgül ağırlık deney sonuçları.....	48
Çizelge 5.9 : Su emme deney sonuçları ve KTŞ limitleri.....	48
Çizelge 5.10 : Los Angeles aşınma deney sonuçları ve KTŞ limitleri	49
Çizelge 5.11 : Yassılık indeksi sonuçları ve KTŞ limitleri	49
Çizelge 5.12 : Organik madde içeriği sonuçları ve KTŞ limitleri	49
Çizelge 5.13 : Metilen mavisi deney sonuçları ve KTŞ limitleri	51
Çizelge 5.14 : Dağılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ limitleri	51
Çizelge 5.15 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları ve KTŞ limitleri	52
Çizelge 5.16 : Numune plastisite indeksleri ve KTŞ limitleri	52
Çizelge 5.17 : ÇBGT’de kullanılan granülometri değerleri	52
Çizelge 5.18 : Alt limit granülometri değerleri	54
Çizelge 5.19 : Alt limit granülometrisinde W - KBHA.....	54
Çizelge 5.20 : Üst limit granülometri değerleri	55
Çizelge 5.21 : Üst limit granülometrisinde W – KBHA.....	55
Çizelge 5.22 : Tasarım granülometri değerleri.....	56
Çizelge 5.23 : Tasarım granülometrisinde W – KBHA.....	56
Çizelge 5.24: Tüm granülometri değerleri için W -MKBHA sonuçları.....	57
Çizelge 5.25 : Alt limit granülometrisi CBR verileri	58
Çizelge 5.26 : Üst limit granülometrisi CBR verileri	60
Çizelge 5.27 : Tasarım granülometrisi CBR verileri	61
Çizelge 5.28 : Tüm granülometri değerleri için CBR (%) sonuçları.....	62
Çizelge 5.29 : Serbest basınç dayanımı deney sonuçları	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Esnek üstyapı kesiti	3
Şekil 3.1 : Türkiye çelik haritası.....	9
Şekil 3.2 : Demir-çelik üretimi şematik gösterimi.....	10
Şekil 3.3 : Yüksek fırın.....	11
Şekil 3.4 : Demir cevheri redüklenmesinin şematik çizimi	11
Şekil 3.5 : BOF çelik üretim aşamaları.....	13
Şekil 3.6 : Elektrik ark fırını tüm üretim süreci.....	14
Şekil 3.7 : Elektrik ark fırını ergitme ve boşaltma işlemleri	15
Şekil 4.1 : Çelik üretimi ile oluşan yan ürün grafiği	18
Şekil 4.2 : Avrupa’da YF cüruf oluşum oranları	19
Şekil 4.3 : Avrupa’da çelikhane cürufu oluşum oranları.....	20
Şekil 4.4 : Avrupa’da YF cüruf kullanımı	23
Şekil 4.5 : Avrupa’da çelikhane cürufu kullanımı.....	25
Şekil 5.1 : Tel sepet ile numunelerin su içinde tartılması.....	31
Şekil 5.2 : Doygun kuru yüzey özgül ağırlık tayini.....	31
Şekil 5.3 : Piknometre içinde kalan havanın boşaltılması	32
Şekil 5.4 : Los Angeles aşınma deneyi.....	34
Şekil 5.5 : Makinadan çıkarılan ve elenen numuneler.....	34
Şekil 5.6 : Yassılık indeksi deneyi.....	35
Şekil 5.7 : Organik madde içeriği deneyi	36
Şekil 5.8 : Metilen mavisi deney düzeneği.....	38
Şekil 5.9 : Kil toprakları ve dağılabilen tane oranı deneyi.....	39
Şekil 5.10 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi	40
Şekil 5.11 : Plastik limit tayini	41
Şekil 5.12 : Modifiye proktor deneyi.....	42
Şekil 5.13 : EAF cürufu ve doğal agrega rutubet numuneleri	43
Şekil 5.14 : CBR deney aleti	43
Şekil 5.15 : Karışımın hazırlanması	46
Şekil 5.16 : Serbest basınç deney mekanizması	47
Şekil 5.17 : Damlaların süzgeç kağıdı üzerindeki görünümleri	50
Şekil 5.18 : ÇBGT tabakası granülometri eğrileri.....	53
Şekil 5.19 : Alt limit granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri	54
Şekil 5.20 : Üst limit granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri	56
Şekil 5.21 : Tasarım granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri	57
Şekil 5.22 : Alt limit granülometrisi penetrasyon grafiği.....	59
Şekil 5.23 : Üst limit granülometrisi penetrasyon grafiği.....	60
Şekil 5.24 : Tasarım granülometrisi penetrasyon grafiği.....	62
Şekil 5.25 : Alt limit granülometrisi serbest basınç dayanımları	63
Şekil 5.26 : Üst limit granülometrisi serbest basınç dayanımları	64
Şekil 5.27 : Tasarım granülometrisi serbest basınç dayanımları	65

ELEKTRİK ARK FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK ÜSTYAPILARDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI GRANÜLER TEMEL TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Artan dünya nüfusu ve teknolojiadaki gelişmeler ile birlikte endüstriyel faaliyetler sonucu ortaya çıkan atık miktarı her geçen gün artmakta ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca mevcut kaynakların da tükenmeye başlaması, atıkların alternatif bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilerek geri kazanımına ilişkin çalışmaları yaygınlaştırmıştır. Özellikle fazla miktarda hammadde gerektiren yol inşaatlarında demir çelik üretiminde ortaya çıkan cürufun kullanılması, çevreye olan katkısının yanı sıra etkin kaynak kullanımı ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır.

Çalışmada, elektrik ark fırınları ile çelik üretimi yapan tesislerde atık madde olarak açığa çıkan Elektrik Ark Fırını (EAF) cürufunun yapay agrega olarak esnek üstyapılarda Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Doğal agrega ile karşılaştırmalı olarak Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013’de belirtilen standartlara göre deneyler yapılmıştır.

Öncelikle yapılan araştırmanın önemi ve amacı açıklanmıştır. Ardından esnek üstyapıları oluşturan tabakalar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca demir çelik üretimi ile ilgili üretim aşamaları ve çeşitleri anlatılmış, dünyada ve Türkiye’de demir çelik sektörünün durumu sayısal veriler ile açıklanmıştır. Demir çelik üretiminde ortaya çıkan cürufun oluşumu, çeşitleri ve özellikleri hakkında birtakım bilgiler verilmiş, cürufların çeşitlerine göre kullanım alanları anlatılmıştır.

Daha sonra EAF cürufunun esnek üstyapılarda ÇBGT tabakasında kullanımının araştırılması yapılmıştır. KTŞ 2013’e göre ÇBGT tabakasında kullanılacak agregaların sahip olması gereken fiziksel özellikleri ile tabakanın stabilitesi hakkında bilgiler verilmiştir. EAF cürufu ve doğal agreganın fiziksel özelliklerinin belirlenmesine ilişkin yapılan özgül ağırlık ve su emme, Los Angeles, yassılık indeksi, organik madde içeriği, metilen mavisi, kil topağı ve dağılabilen tane oranı, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, likit limit ve plastik limit deneyleri anlatılmıştır. Farklı granülometrilere ÇBGT tabakasına uygulanan Modifiye Proktor ve CBR deneyleri ile aynı karışımlara farklı oranlarda çimento ekleyerek hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımı deneyleri anlatılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen bulgular, verilen KTŞ 2013 limit değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Son olarak, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgulara göre değerlendirmeler yapılmıştır. EAF cürufunun esnek üstyapılarda ÇBGT tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. EAF cürufunun yol inşaatında kullanımı ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

INVESTIGATION OF USAGE OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AS ARTIFICIAL AGGREGATE IN CEMENT STABILIZED BASE COURSE OF FLEXIBLE PAVEMENT

SUMMARY

As a result of industrial activities along with increasing world population and technological developments, unserviceable materials named as “waste” increase day by day and affect environment negatively. Various researches conducted associated with waste management topics in order to reduce generated and recycled wastes. Commencement of extinction of the current resources, recycling of waste and evaluating as an alternative raw material source have extended the studies. Arising from production quantity in million degrees and generated as a result of industrial activities, recycling with raw material source usage in different industries, waste disposal, cost reduction and efficient source usage constitutes an importance.

Iron and steel industry products are constituted fundamental raw materials of industrial sectors. It is not only been vital part of the society, but also strategically significance from the point of the countries in sectors such as construction, infrastructure, machinery and automotive with great strength and durability. Steel production is growing day by day all over the world. Only in 2014, 34 million tons steel produced in Turkey while 1,662 million tons produced around the world. Both in Turkey and in the world, 70% of steel productions is performed with EAF furnace. Waste and by products are comprised 90% of slag, dust and sludge in iron and steel industry.

Iron and steel slag constitutes most of the waste product of iron and steel production. Nowadays, production of 1 ton liquid steel generates 169 kg Electric Arc Furnace (EAF) slag, 275 kg blast furnace slag in integrated facilities and 126 kg basic furnace slag. Every year, over 400 million tons iron and steel slag is produced around the world. In the light of this data, considered that steel productions and their increments, obtained slag could be regained as a raw material source for various industries.

One of the sectors that used a major level of raw material is construction sector. Especially, in road constructions in which extra raw material needed, 95% of materials constitutes from aggregate. Consumed aggregate sources increase demand for new aggregate mines (fields) each day passing. This situation also results in an increase of costs. The use of iron and steel slag as a road construction material benefit not only the environment, but also the financial way. Due to the very high costs for landfilling, many solutions have found for recycling. Thereby, use of slag generated during production of iron and steel on road construction besides its contribution to the environment, with efficient source usage it presents an economic solution.

While iron and steel production proceeding on integrated facilities, some solid wastes occur such as blast furnace slag, steel slag, coal ash and dust. Disposing of these solid wastes may cause soil pollution, ground and surface water pollution. Emerged slags seems like “waste” in iron and steel industry, have constituted major part of the waste and by products. Slags defined as marketable products along with increment their usage area. New execution areas enhanced while growth in economical, environmental and social advantages of slag use.

Iron and steel slag is being marketable product with increasing usage possibilities. Slag is widely used in construction sector especially in cement paste, concrete mixture, hydraulic structures and road constructions. Steel plant slag is considered to be very suitable for road constructions based on strength, stability, abrasion, porosity and water absorption properties. Some investigations are being made about steel plant slag if it can be used as sub-base material in road constructions with its great strength properties.

In this study, availability of EAF slag, which is generated as waste product of iron and steel production, was investigated as artificial aggregate in cement stabilized base course of flexible pavement. All of the experiments have done comparatively with natural aggregate within the scope of Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification published in 2013.

First of all, importance and goal of this study were explained literally. Then, general information about flexible pavement layers was asserted. Also, significant processing steps and types of iron and steel production, which are blast furnace, basic oxygen furnace and electric arc furnace, were explicated. Iron and steel industry was revealed with numerical data both for Turkey and world-wide.

Some information have given about generation of slag which is derived from iron and steel production, types of slags, physical and chemical properties of slags. Their generation stages and reactions are given in 4 main topics as blast furnace slag, basic oxygen furnace slag, electric arc furnace slag and secondary metallurgical slag. General usage area and usage ratios were stated in terms of slag types.

Where the experimental studies handled after this section, the usage of EAF slag was investigated in cement stabilized base course of flexible pavement. Certain information detailed about physical properties and layer stabilities of aggregate can be used in cement stabilized base course according to Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification published in 2013. Numerous experiments performed such as density and absorption of aggregate test, Los Angeles abrasion and impact test, flatness index test, determination of organic matter test, methylene blue test, clay lumps and friable particles in aggregates test, durability of freeze effect test, liquid limit test and plastic limit test to determine physical properties of EAF slag and natural aggregate within the scope of Republic of Turkey General Directorate of Highways Technical Specification published in 2013.

Modified Proctor Test and California Bearing Ratio (CBR) Test applied on 3 different grain size distribution examples such as lower limit, upper limit and design limit for cement stabilized base course. According to test results, various ratios cement added on this examples and unconfined compressive test practiced to clarify which grain-size limitation should be used. All of the test results were given in tables in comparison with the specification standard's limit values. Besides, desired strength differential related to cement quantity is determined from 7-day unconfined compression test results. Both EAF slag and natural aggregate samples determined

for physical properties experiments and cement stabilized base course applications. Hereby, physical properties and stability of slag was compared to natural aggregate for an alternative material in cement stabilized base course.

As a consequence, all assessments were made according to experimental test results. Usage of EAF slag was investigated in cement stabilized base course of flexible pavement. If slag is carefully treated beginning at the EAF furnace to the slag plant, it can be a useful and competitive product for road construction and several other applications. Certain suggestions were made about usage of EAF slag in road constructions.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojiadaki gelişmeler, “atık” olarak isimlendirilen, kullanım dışı malzemelerin sebep olduğu çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle hacmi hızla artan sanayi atıkları çevre kirliliğine yol açmakta ve doğal yaşamı olumsuz yönde etkilemektedir. Mevcut kaynakların tükenmeye başlamasıyla birlikte bu sorunların çözümü de önem kazanmaktadır. Günümüzde, meydana gelen atıkların azaltılması, mevcut atıkların ise potansiyel bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi ve kullanılmış hammaddelerin yeniden kullanılması gibi atık yönetim konuları ile ilgili çeşitli araştırmalar yürütülmektedir. Üretim miktarı milyonlar mertebesinde olan ve endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan atıkların farklı endüstrilerde hammadde kaynağı olarak kullanımı ile geri kazanımı, atık bertarafı, maliyet azaltımı ve etkin kaynak kullanımı gibi nedenlerle önem teşkil etmektedir.

Hammadde tüketiminin en çok olduğu sektörlerden biri inşaat sektörüdür. İnşaat sektörü, imalat süreçlerindeki girdileri asgari düzeye indirmeye ve hammadde, enerji tüketimi, emisyonları ve mekan kullanımını mümkün olduğu kadar azaltmaya çalışmaktadır. İnşaat sektöründe en çok tüketilen hammadde agregadır.

Yol inşaatında, esnek üstyapılarda kullanılan malzemelerin ortalama %95’i agregadan oluşmaktadır. Tüketilen agrega kaynakları, civardaki agrega ocaklarından veya doğal agrega kaynaklarından temin edilmektedir. Dolayısıyla her geçen gün yeni agrega ocaklarına olan talep giderek artmakta ve bu ocaklar sebebiyle, yeryüzünün genel yapısı bozulmaktadır. Ayrıca yerleşim yerlerine yakın olan ocaklarda kaliteli malzemenin tükenmeye başlamasıyla birlikte, yerleşim birimlerine daha uzak bölgelere yönelme söz konusu olmaktadır. Bu durum nakliye maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır [1]. Bu sebeple, atıkların yol inşaatında kullanılması çok yönlü yarar sağlamaktadır. Kütlesel miktarda malzeme gerektiren yol inşaatlarında atık kullanımı, bir yandan sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketimini önlerken, diğer yandan inşaat maliyetlerini azaltmak bakımından da fayda sağlamaktadır [2].

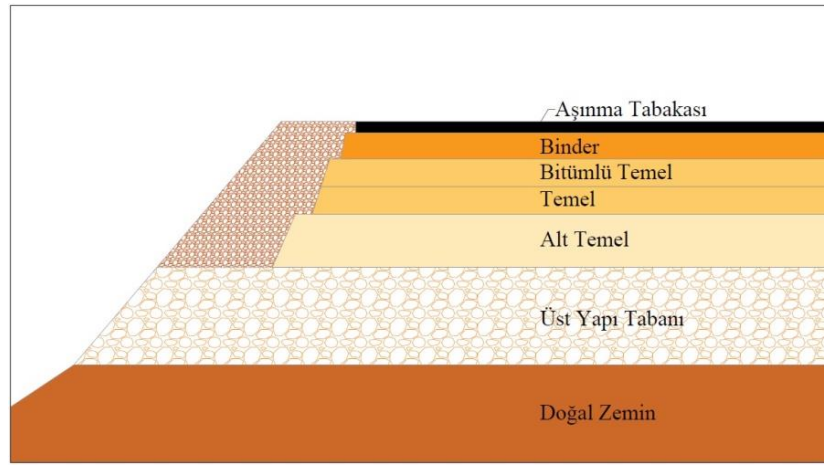
Demir elik üretiminde ortaya çıkan atık ürünlerin büyük bir kısmını cüruf oluşturmaktadır. Farklı retim süreçlerinden elde edilen cürufların farklı karakteristik özellikler gösterdiği bilinmektedir. Cüruflar bu özelliklerine bağlı olarak başta inşaat sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Demir elik cürufları yüksek fırın (YF) cürufu, bazik oksijen fırın (BOF) cürufu, Elektrik Ark Fırını (EAF) cürufu ve pota ocağı cürufu olarak sınıflandırılabilir. Özellikle inşaat sektöründe yol yapımında en fazla tercih edilen cüruflar, hurda çeliğin elik üretimi için kullanıldığı işlemlerde ortaya çıkan EAF cürufudur. Endüstrinin yoğunlaştığı bölgelerde artan cüruf miktarının yol inşaatında kullanılarak geri kazanımı, doğal kaynakları korumanın yanı sıra atıkların sebep olduğu evre problemlerine de çözüm getirmektedir. [3,4].

Bu alışmada, EAF cürufunun esnek styapılarda imento Bağlayıcılı Granüler Temel (BGT) tabakasında yapay agrega olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Doğal agrega ile karşılaştırmalı olarak izlenen yolda, kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Deneysel alışmalarda Kocaeli’de bulunan olakoğlu Metalurji Aş tesislerinden temin edilen EAF cürufu ile Ömerli Alyans Taş Ocağı’ndan alınan doğal agregalar kullanılmıştır. Bu malzemeler kullanılarak Karayolları Teknik şartnamesi (KTş) 2013’e göre tasarlanan BGT tabakasına ilişkin deneyler gerçekleştirilmiştir. EAF cürufu ve doğal agrega özellikleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuç kısmında verilmiştir.

2. ESNEK ÜSTYAPILAR

Esnek üstyapı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı bir sistemdir. Bu tabakalar, dayanımları, performansları, malzeme özellikleri, geçirimsizlik karakteristikleri, yapım teknikleri ve süreleri ile birbirinden çok farklıdır. Yolun yüzey kısmından taban zeminine doğru inildikçe, tabakalarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve kalitesi azalmaktadır. Esnek üstyapıları oluşturan tabakalar, taban zemini ve tabakalardan oluşan esnek yol üstyapısının başarısı, belirtilen tabakaların ve taban zemininin şartnamelere uygun şekilde projelendirilip gerçekleştirilmesine bağlıdır [5,6].

Esnek üstyapı enkesiti genel olarak 7 tabakadan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de verilen esnek üstyapı enkesitindeki bu tabakalar görülmektedir.



Şekil 2.1 : Esnek üstyapı kesiti [7]

2.1. Taban Zemini

Esnek üstyapılar belirli bir taban zemini üzerine inşa edilmektedir. Bu taban zemini, alt yapının sınırını oluşturmaktadır ve yol güzergahında kazılan ya da belirli bir depodan alınan uygun nitelikli zeminle inşa edilmektedir. Taban zemini, sıkıştırma deney sonuçlarına göre belirlenen birim hacim ağırlığı ve su muhtevasını sağlayacak şekilde, mekanik enerji uygulanarak sıkıştırılmaktadır [8].

Esnek üstyapının davranışı taban zemininin taşıma gücü ile doğrudan ilgili olduğundan, taban zemininin üstyapıya istenen desteği sağlayacak şekilde hazırlanması gerekmektedir. Taban zemini, dolgularda zemin cinsi ve sıkıştırma donanımlarının kapasitesine uygun kalınlıklardaki tabakalar halinde serildikten sonra; yarmalarda ise tesviye yüzeyi altındaki kesim kabartılıp optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa erişinceye kadar sıkıştırılmaktadır [6,8].

Dolgu tabanındaki taban zemininin, dolgudaki dolgu malzemesinin ve yarmada kaplama altındaki taban zemininin sıkıştırılması ile zeminin taşıma gücünün artması, oturmaların azalması, zemin mukavemetinin artması ve hacim değiştirme (don kabarması, şişme/büzülme) direncinin artması sağlanmaktadır [9].

2.2. Alt Temel Tabakası

Esnek üstyapıların en alt tabakası olan alt temel tabakası, taban yüzeyi ile temel tabakası arasına yerleştirilen, düşük elastisite modülüne veya CBR değerine sahip olmasına karşın iyi drene olabilen granüler malzemelerle hazırlanan tabakadır.

Alt temel tabakası, zeminlerin don kabarması veya şişme ve büzülme gibi hacim değişimlerine karşı koymak, kaplama altında gerekli drenajı sağlayabilmek, kaplamanın taşıma gücünü arttırabilmek ve taban zemininin taşıma gücünü aşabilecek yüksek gerilmeleri önlemek için inşa edilmektedir [5].

2.3. Temel Tabakası

Kaplama tabakasının altında bulunan temel tabakası, kaplama tabakasına dayanak sağlayarak, üst yapı tabakasının taşıma kabiliyetini artırmak amacıyla granüler malzemelerden bağlayıcı ve bağlayıcı olarak farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde yapılmaktadır. Temel tabakası kaplamalar için gerekli stabilite ve yeterli drenajı sağlamakla yükümlüdür. Temel tabakasının yüksek stabiliteli olması gerekiyorsa bitüm veya çimento ile stabilize edilmesi gerekmektedir [5,8].

Karayollarında üç farklı temel tipi uygulanmaktadır.

- Granüler temel (GT)
- Plent-Miks temel (PMT)
- Çimento bağlayıcı granüler temel (ÇBGT)

2.3.1. Granüler Temel (GT) tabakası

Granüler Temel (GT) tabakası, belirli fiziksel özelliklere ve granülometriye sahip agreganın optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra, silindirler ile maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılması sonucu elde edilen stabil bir temel tabakasıdır.

2.3.2. Plent-Miks Temel (PMT) tabakası

Plent-Miks Temel (PMT) tabakası, granüler temel tabakasında olduğu gibi, belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelenmiş granülometriye sahip agreganın plentte optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilmektedir.

2.3.3. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakası

Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakası, belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelenmiş granülometriye sahip agregaya belirli bir oranda plentte çimento ve su katılarak karıştırılıp yola serilmesi ve sıkıştırılması ile elde edilmektedir.

Esasen ÇBGT tabakası bir çeşit zayıf betondur. Normal betona nazaran düşük çimento dozajına ve az işlenebilirliğe sahip ÇBGT tabakası, özellikle yüksek trafikli yollarda ve otoyol gibi yüksek standartlı yollarda, yüksek stabiliteli bir temel tabakası olarak kullanılmaktadır [5,6].

2.4. Bitümlü Karışım Tabakaları

Bitümlü karışımlar sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı şekilde imal edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bitümlü sıcak karışımlar, asfalt ve agreganın ısıtılıp plentte karışımı ile elde edilerek sıcak olarak sıkıştırılmakta ve esnek üstyapı kaplamalarının üst tabakalarında kullanılmaktadır. Bitümlü soğuk karışımlar, sıvı asfaltlar (katbek veya emülsiyon) ile agreganın soğuk olarak yolda veya plentde karıştırılması ile elde edilmekte ve soğuk olarak sıkıştırılmaktadır.

Trafik yüklerinden kaynaklanan gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz kalan bitümlü karışım tabakası, temel ve alt temel tabakalarına göre daha stabildir. Bitümlü karışım tabakası, aşınma, binder ve bitümlü temel olarak isimlendirilmektedir [10].

2.4.1. Bitümlü temel tabakası

Bitümlü temel tabakası, belirli granülometri limitleri içindeki kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin plentte sıcak bitümlü bağlayıcı ile karıştırılması ile elde edilmektedir. Bitümlü temel tabakası, granüler temel ve alt temele gelen yükleri büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle orta ve yüksek trafikli yollarda, kaplama ile granüler temel arasında bir veya birden fazla tabakalar halinde kullanılmaktadır [8,10].

2.4.2. Kaplama tabakası

Kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlayan, yüksek stabiliteye sahip, esnek üstyapıların en üst tabakasıdır. Kaplama tabakası, yüksek standartlı yollarda aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde, düşük standartlı yollarda ise tek kat veya çift kat sathi kaplama olarak ve bitümlü sıcak karışımlar ile yapılmaktadır.

Kaplama tabakasının performans (sürüş konforu, emniyeti) ve stabilite (deformasyona karşı direnç) olmak üzere iki temel görevi bulunmaktadır. Buna göre kaplama tabakası aşağıdaki işlevleri sağlamalıdır.

- Düzgün ve pürüzsüz yüzeyler ile sürüş konforunu arttırmalı ve taşıt işletme giderlerini azaltmalıdır.
- Yeterli kayma direncine sahip olmalıdır.
- Trafik yüklerinden kaynaklı aşınmalara ve deformasyonlara karşı yeterince dirençli olmalıdır.
- Bakım ve onarım maliyetlerinin az olması için yeterli yorulma mukavemetine sahip olmalıdır.
- Yağmur sularının sızmasını önleyecek kadar geçirimsiz olmalıdır.
- Don kabarması ve şişmelerden dolayı oluşabilecek gerilmelere karşı yeterli rijitliğe sahip olmalıdır.
- Zeminin uzun dönem oturmalarında çökmelere uyum sağlayabilecek kadar esnek davranış göstermelidir.
- Trafik yüklerini emniyetli bir şekilde zemine iletebilmelidir.
- Trafik, iklim ve çevre etkilerine karşı dirençli ve dayanıklı olmalıdır [10].

3. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ

3.1. Demir Çelik Sektörü

Demir çelik endüstrisinin ürünleri geçmişte ve günümüzde çeşitli endüstriyel sektörlerin temel hammaddelelerini oluşturmuştur. Çelik ürünler gerek miktar, gerekse cins ve kalitelerinin gelişimi ile endüstriyel gelişmenin de en önemli unsurunu oluşturmuştur. Dolayısıyla, demir çelik endüstrisi, insanlık tarihinde uygarlıkların gelişmesinde ve toplum yapılarının değişiminde rol oynamış en önemli sektörlerden birisi olmuştur [11].

Günümüzde çelik, dayanıklılığı ve sağlamlığı ile inşaat, altyapı, makine ve otomotiv sektörleri gibi kullanım alanları ile toplumun ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu sebeple, demir çelik sektörü ülkeler açısından stratejik öneme sahiptir.

Dünyada ham çelik üretimi genel olarak bir artış göstermektedir. 2000 yılından 2014 yılına kadar Dünya'daki ve Türkiye'deki ham çelik üretim miktarları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. 2011 ile 2014 yılları arasında dünyada ham çelik üretimi artış gösterirken Türkiye'de bu yıllar arasında ham çelik üretiminde düşüş yaşanmıştır.

Çizelge 3.2'de 2014 ve 2013 yıllarında dünya ham çelik üretiminde ilk 15 sırayı alan ülkeler ve ham çelik üretim miktarları verilmiştir. Türkiye, ham çelik üretiminde 2013 yılında olduğu gibi 2014 yılında da dünya sıralamasında 8'inci sırada yer almıştır. 34 milyon ton ham çelik üretimi ile dünya üretiminin yaklaşık %2'lik kısmını gerçekleştirmiştir [12,13].

Türkiye Çelik Üreticileri Derneği'nin hazırlamış olduğu 2014 yılına ait Türkiye'de bulunan demir çelik endüstrilerinin ülke genelindeki dağılımı ve bölgelere göre üretim kapasiteleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Türkiye genelinde kapasite kullanım oranı 2014 yılında %68 olarak belirlenmiştir [14].

Çizelge 3.1 : Yıllara göre ham çelik üretimi [12]

Yıl	Dünya üretimi (milyon ton)	Türkiye üretimi (milyon ton)
2000	850	14
2001	852	15
2002	905	16
2003	971	18
2004	1.063	20
2005	1.148	21
2006	1.250	23
2007	1.348	26
2008	1.343	27
2009	1.238	25
2010	1.433	29
2011	1.537	34
2012	1.559	36
2013	1.649	35
2014	1.662	34

Çizelge 3.2 : Ham çelik üretimindeki 15 ülke [13]

Sıra	Ülke	Üretim (milyon ton)	
		2014	2013
1	Çin	822,7	815,4
2	Japonya	110,7	110,6
3	Amerika	88,3	86,9
4	Hindistan	83,2	81,3
5	Güney Kore	71,0	66,1
6	Rusya	70,7	68,9
7	Almanya	42,9	42,6
8	Türkiye	34,0	34,7
9	Brezilya	33,9	34,2
10	Ukrayna	27,2	32,8
11	İtalya	23,7	24,1
12	Tayvan	23,3	22,3
13	Meksika	19,0	18,2
14	İran	16,3	15,4
15	Fransa	16,1	15,7



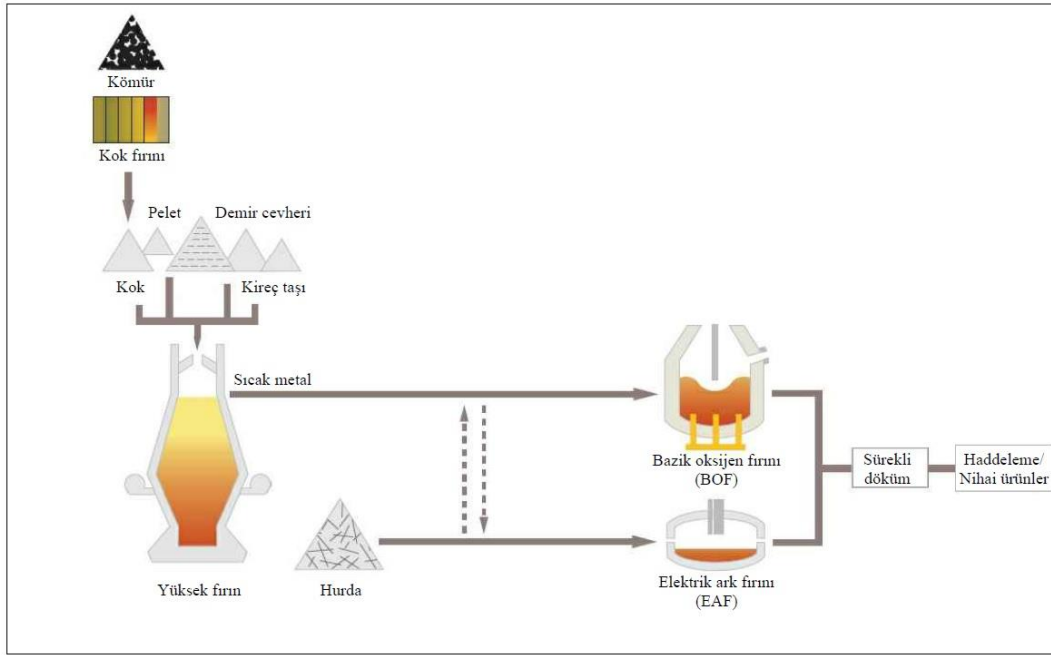
Şekil 3.1 : Türkiye çelik haritası [14]

3.2. Demir Çelik Üretimi

Günümüzde demir çelik ürünleri üretimi için kullanılan iki yaygın sistem bulunmaktadır. Bunlardan ilki yüksek fırınlar (YF) ile demir cevherinden ham demir ve Bazik Oksijen Fırını (BOF) ile ham demirden çelik üretimi yapan entegre tesislerdir. Diğeri ise Elektrik Ark Fırını (EAF) ile çelik hurdasından çelik üretimi yapan sistemlerdir [15]. Şekil 3.2’de bu üretim sistemleri şematik olarak gösterilmiştir.

Türkiye’de 2014 yılında çelik üretiminin %70’i elektrik ark fırınlı (EAF) tesislerde, %30’u ise bazik oksijen fırınlı (BOF) entegre tesislerde gerçekleşmiştir. Demir cevheri bazlı üretim yapan entegre tesislerin ham çelik üretimi 10,3 milyon ton iken, hammaddesi hurda olan elektrik ark fırınlı (EAF) tesisler 23,8 milyon ton seviyesinde üretim yapmıştır [17].

2014 yılında Dünya genelinde yapılan çelik üretiminin %70’i Bazik Oksijen Fırını (BOF) entegre tesislerde, %29’u Elektrik Ark Fırını (EAF) tesislerde, %1’lik küçük bir kısmı da Siemens-Martini fırını olarak geçen açık fırınlarda (OHL) gerçekleşmiştir [13].



Şekil 3.2 : Demir-çelik üretimi şematik gösterimi [16]

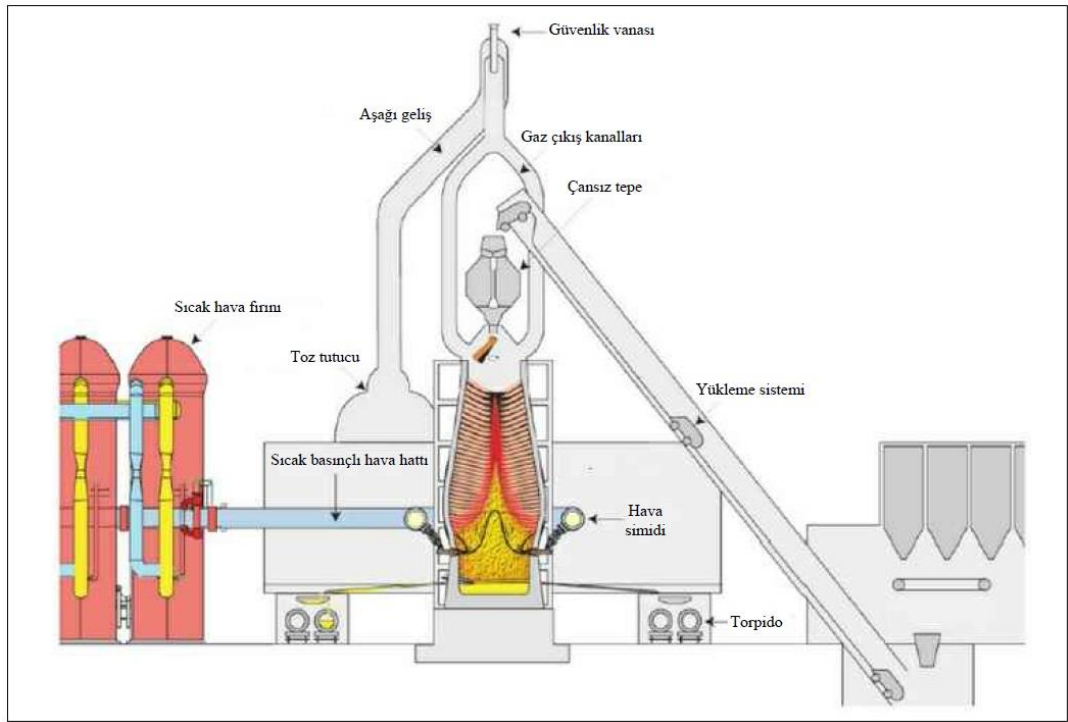
3.2.1. Yüksek Fırınlr (YF)

Yüksek fırınlar (YF), demirli malzemelerin içeriğinde bulunan demir oksidin indirgenmesi sonucunda oluşan ve fiziksel olarak sıcak metale (sıcak maden, sıvı pik) dönüştürülmesini sağlayan işlemin gerçekleştirildiği fırınlardır. Entegre tesislerin ana üretici pozisyonunda olan yüksek fırınlar, görünüm olarak çelik bir baca şeklinde olup, iç tarafı özel malzemeler ile örtülüdür [11].

Demirli malzemeler, metalürjik kok ve cüruf yapıcı malzemeler fırına yukarıdan şarj edilirken alttan ise ön ısıtmalı hava üflenir. Aşağı inen malzemeler sıcak metal ve sıvı cüruf olarak fırın haznesinden ayrılır. Daha hafif olan cüruf üst tarafta, sıcak metal de alt tarafta birikir ve ardından fırından boşaltılır. Şekil 3.3’de yüksek fırının genel görünümü verilmiştir [18].

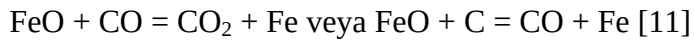
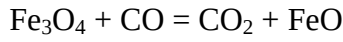
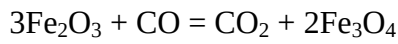
Demirli malzemeler fırına parça cevher, sinter ve pelet olarak şarj edilirler. Entegre tesislerde kullanılan demir cevherleri hematit (Fe_2O_3) ve manyetit (Fe_3O_4) fazında olup, demir içeriği yaklaşık %50-70 arasındadır.

İndirgeyici madde olarak kullanılan kok ise, kömür karışımından üretilir. Kok, fırın içinde malzemelerin düzgün biçimde aşağı inmesine destek olan, yüksek termal enerji ve yüksek metal redüksiyonu ile sıcak metal ve gaz akışını sağlamak için optimum geçirgenlik sağlayan bir malzemedir.

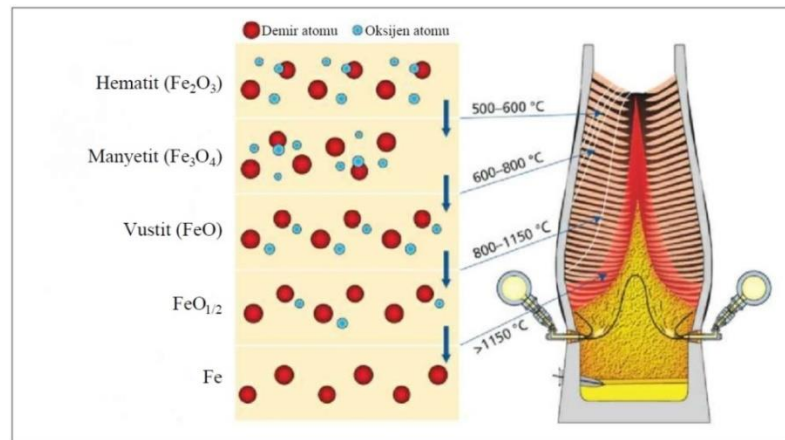


Şekil 3.3 : Yüksek fırın [18]

Demir cevheri, pelet ve sinter, oluşan seri reaksiyonlar ile bünyesinde bulunan oksijenin uzaklaşması ve demirin yalnız kalması ile redüklenir. Bu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Bu reaksiyonların fırın içerisinde gerçekleştiği ısı aralıkları ve sırası Şekil 3.4'de verilmiştir.

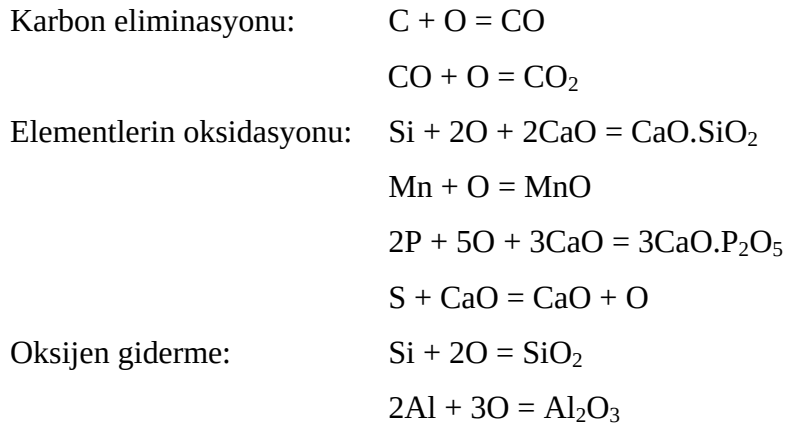


Şekil 3.4 : Demir cevheri redüklenmesinin şematik çizimi [18]

3.2.2. Bazık Oksijen Fırını (BOF)

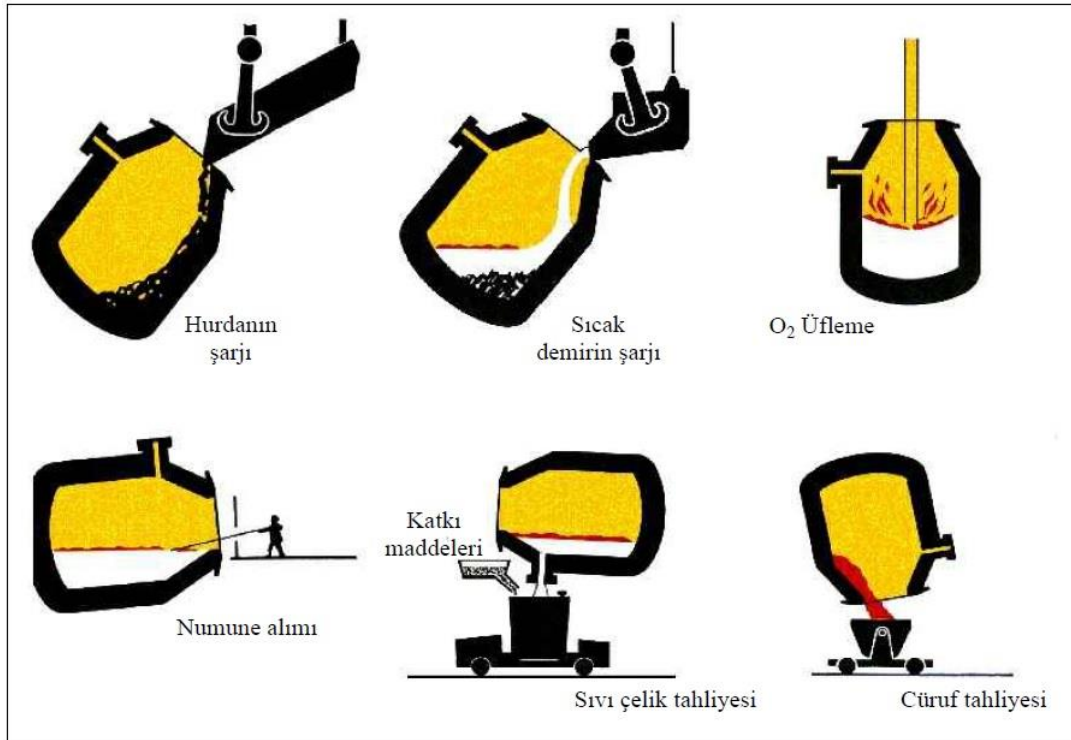
Bazık oksijen fırınları ile çelik üretimi işleminin temel hammaddeleri sıcak demir ve hurdadır. Toplam şarjın %70-80'ini sıcak metal, geri kalanı ise hurda, kireçtaşı ve dolomitten oluşmaktadır. Bu oranlar ülkelerin ve fabrikaların hammadde imkanlarına ve kalite stratejilerine göre değişiklik göstermektedir. Sıcak demir ve hurdadan sonra en önemli girdi oksijendir. Saflığı %99,5'i bulan oksijen, sıcak demir ve hurda şarj edilmiş fırına hızla üflenir, üflenen bu oksijen sıvı banyosundaki reaksiyona girer. Ekzotermik özellikte olan bu reaksiyonlar sonucu oluşan ısı, hem banyodaki hurdayı eritir hem de ortalama 1450°C banyo ısını 1600°C'nin üzerine yükseltir [11].

BOF'de oksijen üflenmesi ile oksitlere dönüştürülen başlıca elementler, karbon, silisyum, magnezyum, fosfor ve kükürttür. Bu oksidasyon işleminde hedef, karbon içeriğini istenen seviyelere indirmek (yaklaşık %4'ten %1'in altına), istenilen ilave elementlerin içeriğini ayarlamak ve istenmeyen empüriteleri mümkün olan en iyi seviyeye indirmektir. BOF'de meydana gelen oksidasyon işlemleri aşağıda verilmiştir.



İlk tepkime ile üretilen CO ve CO₂ üst taraftan dışarı atılırken diğer tepkimelerin ürünleri cüruf olarak eriyik çeliğin üzerinde birikir. Bu işlem bittikten sonra, önce sıvı çelik ardından da sıvı cüruf alınır. [19].

Şekil 3.5'de BOF ile çelik üretim aşamaları verilmiştir. Öncelikle konvertöre hurda yüklemesi yapılır, daha sonra ise yüksek fırından gelen sıcak demir yüklemesi yapılır. Oksijen üfleme işleminin ardından sıvı çeliğe katkı maddeler ilave edilir ve cürufun tahliyesi ile işlem sonlanır [20].



Şekil 3.5 : BOF çelik üretim aşamaları

3.2.3. Elektrik Ark Fırını (EAF)

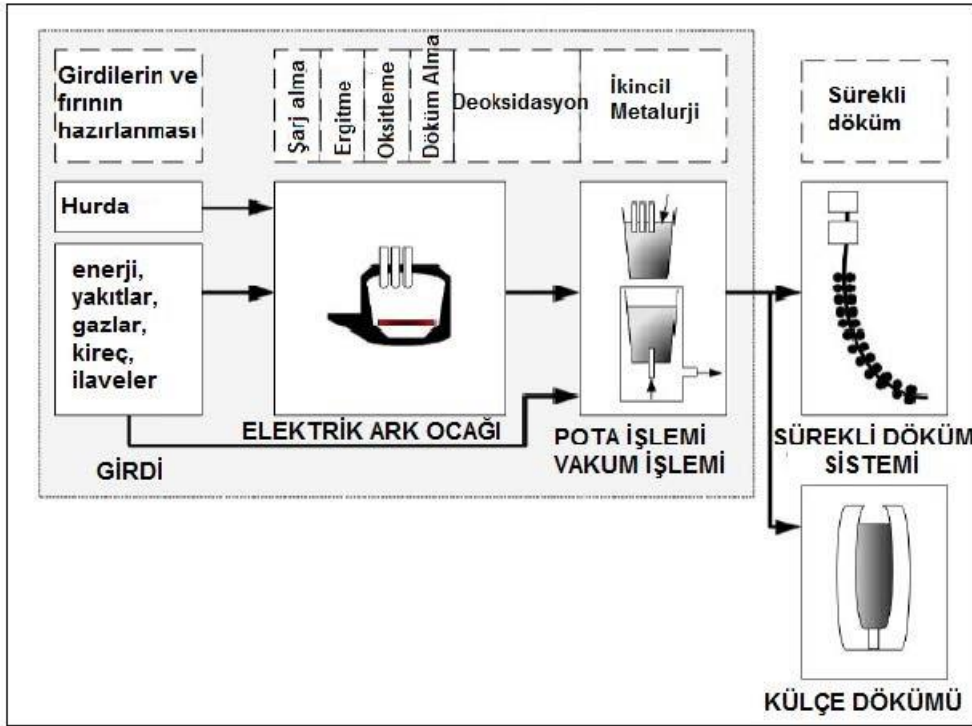
Elektrik Ark Fırını (EAF), çelik hurdasının elektrik enerjisi kullanılarak bir banyo ertirme işlemi ile yapılan ve çelik üretim işletmeciliğinde kullanılan fırınlardır. Hurda ile birlikte cüruf oluşturmak amacıyla, eklenen kireç ve dolomit ayrıca çelik üretim işlemini iyileştirmek için karbon içeren malzemeler EAF'nin hammaddesini oluşturmaktadır [11]. EAF prosesini oluşturan üretim basamakları Şekil 3.6'da verilmiştir.

Ergitmenin ilk aşamasında, düşük bir güç ile elektrotlar hurda yükünü delmeye çalışılmaktadır. Ark hurda yükü delindikten hemen sonra, hurda ile çevrilen elektrotlarla tam ertirme yapabilmek için güç arttırılır. Oksijen lansı veya oksijen-yakıt brülörleri (doğal gaz, LPG, CH₄, vs.) ergitmenin ilk aşamalarında kullanılır.

EAF ile çelik üretiminde oksijen kullanımı, metalürjik sebepler, üretkenlik ve enerji verimliliği açısından önemlidir. EAF'de oksijen kullanımı birçok amaca hizmet eder:

- Oksijen ve toz karbonun birlikte enjeksiyonu ile CO baloncukları sayesinde köpüklü cüruf üretimi mümkün olmaktadır. Bu üretim tekniği, fırın duvarlarının artan kaynaklanan radyasyondan korunmasını ve ark enerjisinin çeliğe aktarım verimini arttırmaktadır.

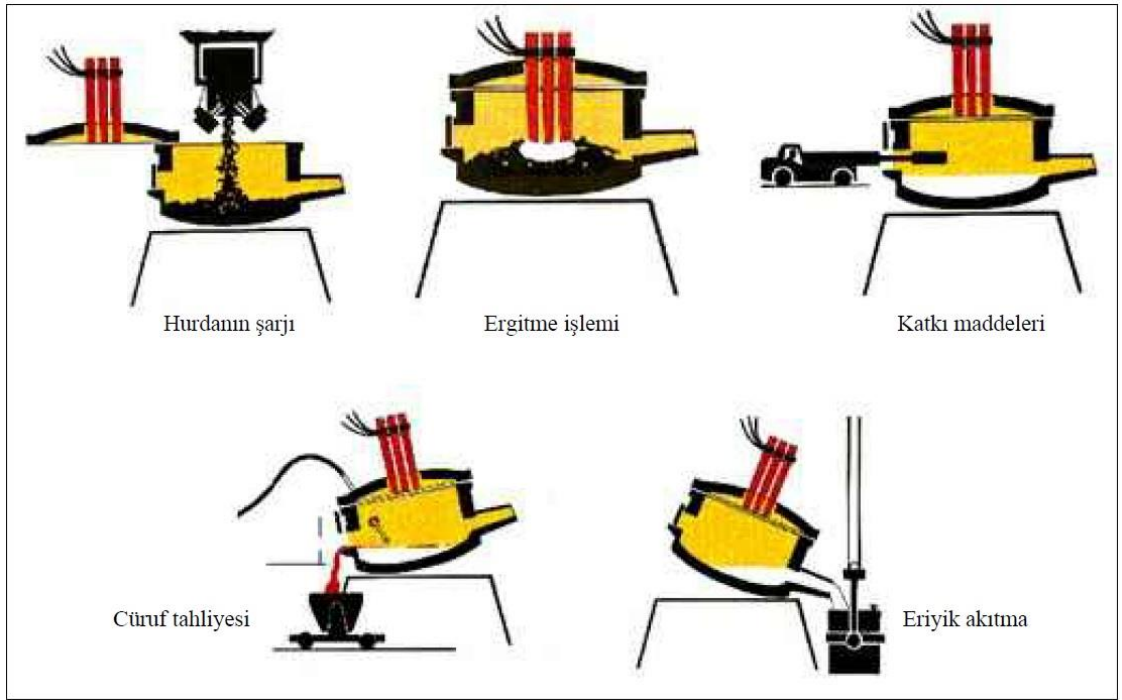
- Oksijen, karbonsuzlaştırmada ve fosfor, silisyum gibi istenmeyen elementlerin alınması amacıyla kullanılmaktadır.
- EAF gövdesinden çelik banyosunun üstüne oksijen enjekte edilerek yanma gazları fırını terk etmeden önce, oksijen CO ile reaksiyona girerek fırın içerisinde ekzotermik reaksiyonlardan ortaya çıkan ısıнын mümkün olduğu kadar çoğunu tutmaya yaramaktadır [21].



Şekil 3.6 : Elektrik ark fırını tüm üretim süreci [21]

Cüruf, döküm işleminden önce ısıtma ve oksitlenme esnasında alınmaktadır. Fırın belirli bir açı ile devrilerek cürufun fırından cüruf potasına aktarılması sağlanmaktadır. Bu işlemler sırasıyla Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Ana çelik yapım ocağından potaya alınan sıvı çeliğin, döküm makinasına gönderilmesinden önce ikinci metalürji gerçekleşmektedir. Pota ocağında gerçekleşen bu işlem sıvı çeliğin son sıcaklığın ayarlanmasına imkan tanımaktadır. Deoksidant malzemeler ile alaşım elementleri, çeliğin son kimyasal kompozisyonunu ayarlamak amacıyla katılmaktadır. Çeliğin son halinde bulunması istenen hidrojen, nitrojen veya oksijen gibi elementlerin yoğunluğunun ayarlanması ile inert gazların (argon ve azot) ilavesi potada gerçekleşmektedir [21].



Şekil 3.7 : Elektrik ark fırını ergitme ve boşaltma işlemleri

4. CÜRUF OLUŞUMU, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

4.1. Cüruf Oluşumu

Demir çelik üretiminde ortaya çıkan atık ve yan ürünlerin %90'ını cüruf, toz ve çamur oluşturmaktadır. Bu cüruflar genel olarak silika, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alüminyum ve demir oksit karışımlarını barındırmaktadır [22].

Farklı işlemler ile elde edilen cürufların fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılık göstermektedir. Bu sebeple, cürufların tekrar değerlendirilmesi çalışmalarında üretim işlemlerinin bilinmesinde fayda vardır [23].

Demir çelik cürufları ana tipleri şu şekilde sınıflandırılabilir.

(i) Yüksek fırın (YF) cürufu (demir cürufu)

(ii) Çelikhane cürufları

(a) Bazik oksijen fırını (BOF) cürufu

(b) Elektrik ark fırını (EAF) cürufu

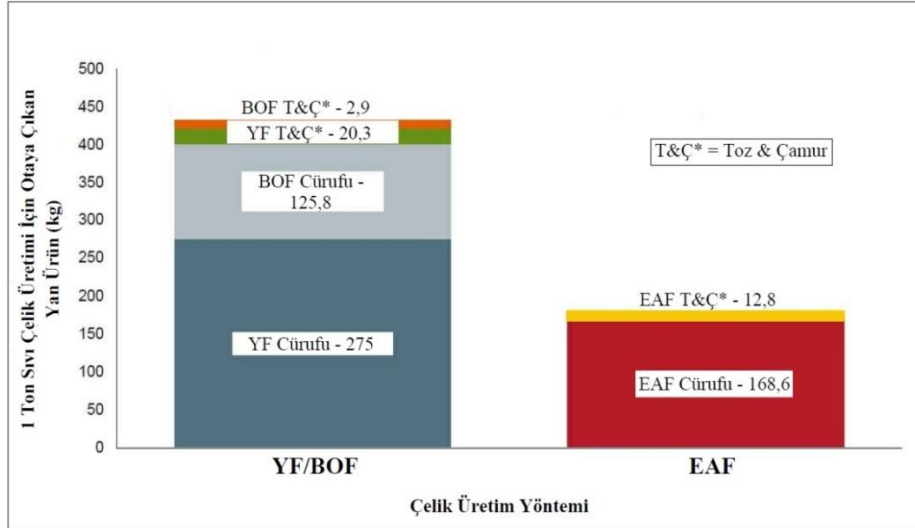
(c) Pota ocağı cürufu [24]

Günümüzde 1 ton sıvı çelik üretimi sonunda ortaya çıkan atık ve yan ürün miktarları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Entegre tesislerde gerçekleşen 1 ton sıvı çelik üretimi için yaklaşık 275 kg yüksek fırın (YF) cürufu, 126 kg bazik oksijen fırını (BOF) cürufu oluşmaktadır. Toz, çamur ve diğer malzemelerden oluşan atık ürünler ise YF'de 20 kg, BOF'de 3 kg oluşmaktadır. Elektrik ark fırını (EAF) ile üretimi yapan tesislerde 1 ton sıvı çelik üretimi için yaklaşık 169 kg EAF cürufu ve 13 kg toz, çamur ve diğer malzemelerden oluşan atık ürünler ortaya çıkmaktadır. Dünyada ortalama her yıl 400 milyon tonun üzerinde demir ve çelik cürufu üretilmektedir [22].

4.1.1. Yüksek Fırın (YF) cürufu

Yüksek fırın (YF) cürufu, yüksek sıcaklık altında demir cevherlerindeki yabancı oksitler, kireçtaşı, dolomit, kuvarsit (çakmaktaşı) ve manganez gibi ilave malzemeler ile kok külünün birleşerek erimesi sonucu meydana gelmektedir. Cürufu oluşturan oksitler; SiO_2 , CaO , MgO , FeO , MnO ve en fazla CaS bulunan sülfürlü bileşiklerdir.

Cürufu meydana getiren oksitlerin katı halden sıvı hale geçişindeki ısı aralığı ne kadar büyükse, fırında, kok parçalarının arasını dolduran gazların hareketine ve dağılımına engel olan yapışkan kütle de fırında hacimsel olarak büyük bir bölgeyi kaplamaktadır. Bu nedenle cürufu oluşturan malzemenin yumuşama ısı aralığı olabildiğince düşük olmalıdır [11].



Şekil 4.1 : Çelik üretimi ile oluşan yan ürün grafiği [22]

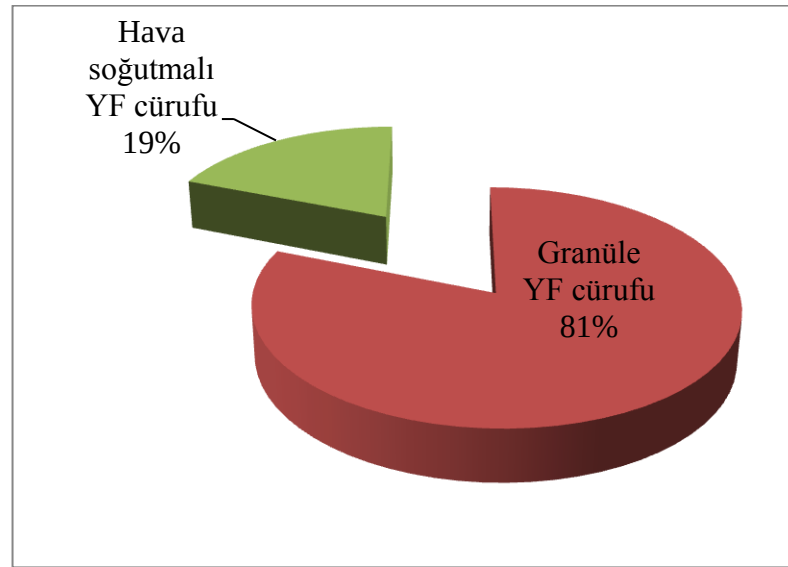
Cüruf oluşum işlemi ilk, ara ve son cüruf olmak üzere üçe ayrılmaktadır. İlk cüruf kolay eriyen bileşiklerin cüruf oluşumunun başlangıç safhasında erimesi sonucunda meydana gelmektedir. İlk akışkan cüruf 1100-1200°C’de oluşmaktadır. Sıcaklığı daha yüksek olan bölgelere gelen ilk cüruf ısınır ve kimyasal bileşimi sürekli olarak değişen ara cüruf oluşmaktadır. Son cürufun, yanan kok külünün ve kireç artıklarının cüruf içinde erimesinden, sıcak maden ve cüruf arasında kükürdün ayrılmasından sonra haznede oluşumu gerçekleşmektedir [11].

Yaklaşık 1500°C’de olan YF cürufunun tahliye edilmesinden sonra uygulanan soğutma yöntemi, oluşacak ürünün özelliklerini ve kullanım yerini belirlemektedir. YF cürufu soğutma yöntemleri üç ana gruba ayrılmaktadır.

- **Havada Soğutma Yöntemi:** YF cürufu, havada soğutma yöntemi ile atmosferik koşullarda yavaş bir şekilde soğutulmaktadır. Bu yöntem ile mineralojik olarak iri kristalli bir malzeme oluşmaktadır. Camsı fazı düşük olan bu malzeme kırılarak istenilen boyuta getirilebilmekte, beton ve asfalt agregasında kullanılabilmektedir.

- Genleştirme Yöntemi: YF cürufu kontrollü miktarda su, basınçlı hava ve buhar etkisi ile soğutulduğu takdirde gözenekli yapıya sahip, iri kristal taneli bir malzeme oluşmaktadır. Bu malzeme hafifliği nedeni ile hafif beton üretiminde kullanılabilir. [25].
- Granülasyon Yöntemi: Genleştirmeye oranla daha fazla miktarda su kullanılarak yapılan ani soğutma işlemidir. Bu işlem sonucu kuma benzer camsı yapıda, hidrolik özelliği olan taneli bir malzeme oluşmaktadır. Bu malzemenin öğütülmesi işlemi ile “öğütülmüş taneli YF cürufu” elde edilmektedir. 1 ton taneli YF cürufu elde etmek için 10 ton suya ihtiyaç vardır [25].

Avrupa’da 2012 yılında 23 milyon ton YF cürufu oluşmuştur. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, bu cürufun %81’ini taneli YF cürufu, %19’unu ise hava soğutmalı YF cürufu oluşturmaktadır.



Şekil 4.2 : Avrupa’da YF cüruf oluşum oranları [26]

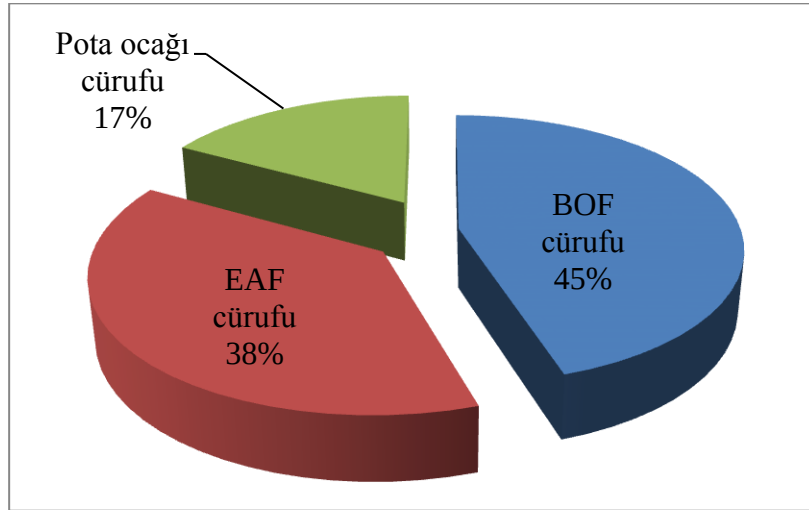
4.1.2. Çelikhane cürufları

Çelik üretiminde ortaya çıkan çelikhane cürufları, toplam sıvı çelik üretiminin yaklaşık %15-20’si kadardır. Çelikhane cürufları temel olarak CaO, Fe, SiO₂, MgO ve MnO bileşenlerinden oluşmaktadır. Fe, demir oksit ve demir taşıyan mineraller olarak %7 ile %10 arasında bir oranda bulunmaktadır [27].

Çelikhane cürufları hava soğutmalı YF cüruflarına benzer şekilde kurutulmaktadır. Fakat üretildikleri fırın tipine göre çelikhane cürufları üç farklı şekildedir:

- Bazık oksijen fırını (BOF) cürufu
- Elektrik ark fırını (EAF) cürufu
- Pota ocağı cürufu [24]

2012 yılında Avrupa’da 21,4 milyon ton çelikhane cürufu oluşmuştur. Şekil 4.3’de görüldüğü üzere, bu cürufun %45’ini BOF cürufu, %38’ini EAF cürufu, %17’sini ise pota ocağı cürufu oluşturmaktadır.



Şekil 4.3 : Avrupa’da çelikhane cürufu oluşum oranları [26]

4.1.2.1. Bazık Oksijen Fırını (BOF) cürufu

Bazık Oksijen Fırını (BOF) cürufunun kimyasal kompozisyonu ve miktarı, konvertöre şarj edilen hammaddelere, elde edilecek çeliğin cinsine ve işletme pratiğine göre farklılık göstermektedir. Yüksek fosforlu sıcak metal kullanımında %8-12 SiO₂ bulunurken, düşük fosforlu çalışmalarda %15-20 SiO₂ bulunmaktadır. MnO artışı ise cüruf akışkanlığını etkileyen bir faktördür. Fazla akışkan cürufu ile çalışılması, fırının taşmasına ve verimliliğin düşmesine sebep olurken, düşük MnO ile çalışılması metal banyosundan sıçrayan parçacıkların oksijen lansına yapışmasına neden olmaktadır. BOF’larında manganın %80’i, fosforun %90’ı oksitlenerek cürufa geçmektedir.

Elde edilen BOF cüruflarının iki özelliği, reaksiyonlar ve çelik yapımı için önemlidir:

- Bazıklık: Özellikle düşük fosforlu sıcak metallerin BOF için tercih edildiğinde fosfor ve kükürdün giderilmesi için bazıklık minimum %3,5 (teorik) olmalıdır.

- Cüruf oksitlenme düzeyi: Cüruftaki FeO oranı metal banyosuna oksijen verdiği için çelik yapımında önemlidir. Ancak cüruftaki fazla demir oksit konvertör astarının aşınmasında önemli bir etkidir. Konvertörde yüksekten oksijen üflenmesi cürufta FeO seviyesini arttırmaktadır.

BOF cürufları yaklaşık 1500°C’de iken sıvı halde cüruf potalarına alınmaktadır. Cüruf, bu potalardan vinçler yardımıyla soğutma yatağına boşaltılıp ve soğutulmaktadır [28].

4.1.2.2. Elektrik Ark Fırını (EAF) cürufu

Hurda metalden çelik üretiminin gerçekleştiği elektrik ark fırınlarında ergitme ve arıtma işlemleri esnasında, istenmeyen malzeme banyoda okside olup ve cüruf fazına geçmektedir. EAF cürufu bünyesinde bulunan bileşikler ve bu bileşiklerin kaynakları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Fosforun ilk etapta cürufa geçmesi avantajdır. Boşaltılan cüruf fosforun uzaklaşmasını sağlamaktadır.

Çizelge 4.1 : EAF cürufunu oluşturan bileşikler [11]

Bileşikler	Kaynak	Kompozisyon oranı %
CaO	Şarjdan	40-60
SiO ₂	Oksidasyon sonucu	5-15
FeO	Oksidasyon sonucu	10-30
MgO	Dolomit şarjından	
CaF ₂	Cüruf akışkanlaştırıcı şarjından	2-5
MnO	Oksidasyon sonucu	
S	Çelikten geçiş	
P	Oksidasyon sonucu	

Cüruf köpükleme işlemi sırasında karbon cüruf içerisine enjekte edilerek CO oluşumu ile FeO’nun metalik demire indirgenmesi sağlanmaktadır. Eğer fosfor bu işlemde önce uzaklaştırılmazsa, fosforun geri dönüşümü oluşabilir ve köpükleme esnasında cüruf taşabilmektedir [11].

Eğer cüruf EAF’deki cüruf potasında biriktiriliyorsa, katılaşması için cüruf çukurlarına dökülüp, soğuması için su spreyi ile desteklenebilmektedir. Bazı sahalarda, cürufun nihai kalitesini ve boyutsal istikrarını geliştirmek için, sıvı haldeyken içine silika, alümina, bor eklenir ve soğuma süresi kontrol edilmektedir.

Eğer cüruf zemine dökülürse, katılaşmasının ardından ekskavatörler veya kürekli yükleyiciler aracılığı ile ön kırma işlemi gerçekleştirilip, ardından cüruf parçalanarak ve elenerek istenen tutarlılığa getirilmektedir. Bu işlem sırasında, cürufta bulunabilecek metal parçalar, manyetik olarak, elle, kazma, parçalama, elekten geçirilme aracılığıyla cüruftan ayrıştır ve geri dönüştürülmektedir [21].

4.1.2.3. Pota ocağı cürufu

Pota ocakları çelik üretim işlemlerinde ikincil işlem olarak adlandırılmaktadır. Üretilen çeliklerin istenilen kimyasal kompozisyona ulaşabilmesi amacıyla ileri seviyede işlenebildiği fırınlardır. İkincil işlemler, özel çelik tiplerinde üretim amacıyla uygulanan son desülfürizasyon, dekarbonizasyon, defosforizasyon ve oksijen, nitrojen gibi gazların uzaklaştırılması işlemlerini içermektedir. Tipik pota ocağı uygulamalarında, alt bölgeden argon gazı geçirilip, sıvı çeliğin karıştırılması ve daha homojen olması sağlanmaktadır. Çelik bileşimindeki sülfür, Ca, Mg, CaSi, CaC₂ gibi maddeler yolu ile cüruf olarak çelikten uzaklaştırılmaktadır. Elde edilen cüruf soğutulduktan sonra kırma işlemi ile istenilen boyuta getirilmektedir [23].

4.2. Cürufların Kullanım Alanları

Demir çelik sektöründe üretim işlemi esnasında yüksek fırın cürufu, çelik cürufu, kömür külü, toz gibi katı atıklar oluşmaktadır. Bu atıkları imha etmek toprak kirliliği, yeraltı ve yüzey suyu kirliliğine sebep olmaktadır [29]. Demir çelik sektöründe ortaya çıkan ve atık olarak görülen cüruflar, atık ve yan ürünlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Cüruflar, kullanım imkanlarının artması ile birlikte pazarlanabilen ürünler olarak tanımlanmaktadır. Cüruf kullanımı ile artan ekonomik, çevresel ve toplumsal fayda yeni uygulama alanlarının doğmasına sebep olmaktadır [4].

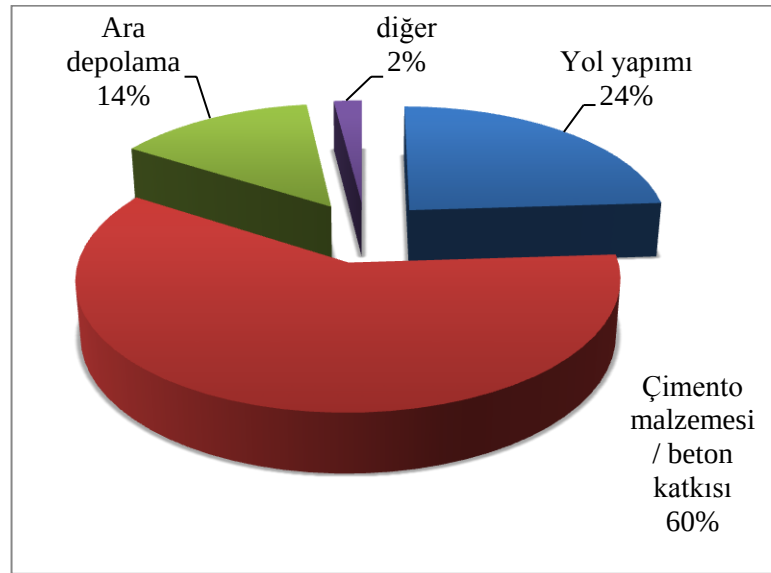
YF cürufu hidrolik bağlayıcılık özelliği olan bir malzemedir. Öğütülerek portland çimentosu katkısı olarak kullanılmaktadır. Bu katkı ile erken basınç dayanımı düşürülürken, geç dayanım ve beton durabilitesi arttırılmaktadır [30]. Hidratasyon hızının portland çimentosuna göre oldukça yavaş olması sebebiyle hızın yükseltilebilmesi için alkali tuzları veya portland çimentosu ile birlikte kullanılmaktadır [25]. Ayrıca YF cürufu, betonda terlemeyi ve betonun su geçirimsizliğini azaltmakta, betonun işlenebilirliğini ve sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır [31].

Yol inşaatında daha çok çelikhane cürufları tercih edilse de YF cürufu da kullanılmaktadır. YF cürufu temel ve alt temel tabakası ile hafif trafik yükleri altındaki yolların asfalt betonunda kullanılmaktadır [32].

YF cürufu, kontrollü bir şekilde su ile soğutma esnasında içerisine buhar hapsolması sağlanarak gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır. Genleştirilmiş YF cüruflarında da, soğutulma işleminin hızlı olmaması sebebiyle iri kristal taneli ve hidrolik bağlayıcı özelliği olmayan bir yapı mevcuttur. Genleştirilmiş cürufların kırılarak istenilen büyüklüğe getirilmesi ile hafif agrega elde edilebilmekte ve hafif beton üretimi yapılarak inşaat alanında kullanılabilmektedir [25].

Ayrıca YF cürufu cam malzemeler ile yer ve duvar karolarının üretiminde de kullanılmaktadır. Seramik üretiminde de kullanılan cüruf, kimyasal kompozisyonunun uygunluğu ve maliyeti düşürecek özellikte olması sebebiyle tercih edilmektedir [33].

Avrupa’da 2012 yılında YF cürufunun kullanıldığı alanlar ile kullanım yüzdeleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. YF cürufunun büyük bir kısmı çimento yapımında, beton katkı malzemesi olarak ve yol yapımında kullanılmıştır [26].



Şekil 4.4 : Avrupa’da YF cüruf kullanımı [26]

Çelikhane cürufu olan EAF cüruflarının mekanik mukavemeti, rijitlik, aşınma, porozite ve su emme gibi özellikleri, yol inşaat malzemesi kullanılabilirliği açısından uygundur. Fakat hacimsel stabilitenin sağlanmasındaki güçlüklerin göz önüne alınması gerekmektedir [34]. Dayanımı yüksek olan çelikhane cürufu, altyapı

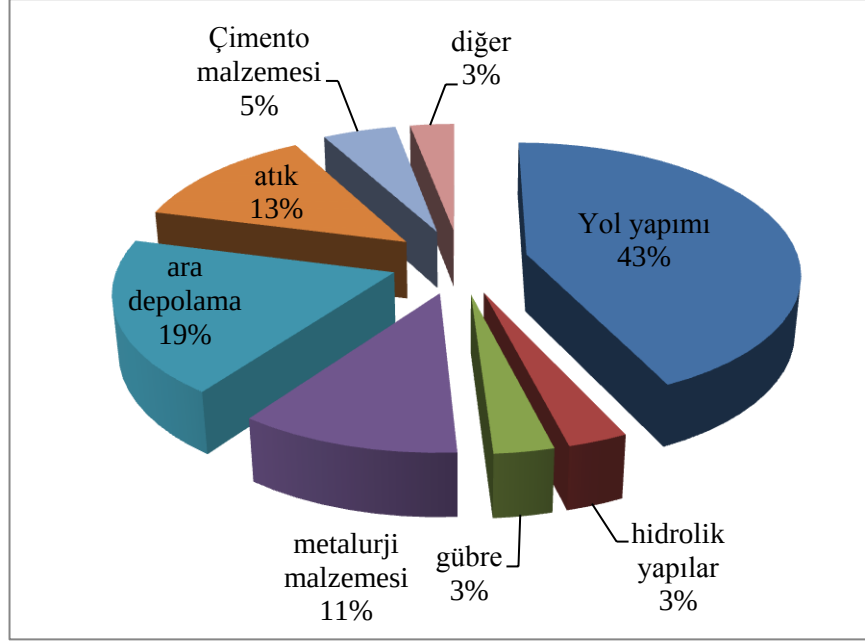
malzemesi, yol yapımı (kaplama ve temel) ve su yapılarında kullanılabilmektedir. Yol yapımında dikkat edilmesi gereken husus cüruf içerisindeki kireçtir. Serbest kirece bağlı genleşme gözlenebilmekte, bu da hacimsel stabiliteyi etkilemektedir. Cüruf içindeki serbest kirecin özelliklerini kaybetmesi için kullanımdan önce uzun süre bekletilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çelikhane cüruflarının özgül ağırlıklarının fazla olması, taşıma maliyetinin artmasına sebep olmaktadır [28].

Basınçlı hava ve aşındırıcı parçacık (grit) karışımı, birçok malzeme yüzeyinin temizlenmesinin geleneksel bir yoludur. Kum raspası adı verilen bu işlem ile boya öncesi çelik konstrüksiyonlar ve tersanelerdeki gemi gövdeleri yüzeylerindeki oksitlerin veya eski boyaların temizlenmesi yapılmaktadır. Ekonomik ve hızlı olan kum raspası metodunda aşındırıcı parçacık olarak çelikhane cürufu kullanımı bir alternatif oluşturmaktadır [35].

Ana malzemesi çelikhane cürufu olan, YF cürufu katkılı portland çimentosu Çin Halk Cumhuriyeti'nde 20 yılı aşkın süredir kullanılmakta ve çelikhane cüruf tüketiminin %40'ını oluşturmaktadır. Bu çimentolar, portland çimentosu ile kıyaslandığında, düşük hidrasyon ısı, düşük enerji maliyeti ve yüksek geç dayanımına sahiptir. Dezavantajları ise, düşük erken dayanıma ve uzun priz süresine sahip olmalarıdır [36].

Uzun çalışma geçmişi olan çelikhane cüruflarının, ilk olarak 1880 yılında fosfat gübresi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Günümüzde de çelikhane cürufları içerdikleri Fe ve bitkiler için faydalı elementler ile gübre olarak kullanılmaktadır [37, 38].

2012 yılında Avrupa'da çelikhane cürufunun kullanıldığı alanlar ile kullanım yüzdeleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Çelikhane cürufu birçok farklı alanda kullanılmıştır. Büyük bir kısmının yol yapımında kullanıldığı görülmektedir [26].



Şekil 4.5 : Avrupa’da çelikhane cürufu kullanımı [26]

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın amacı olan, Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasında EAF cürufu kullanımının incelenmesi için yapılan deneylerde, Kocaeli’de bulunan Çolakoğlu Metalurji AŞ tesislerinden alınan EAF cürufu, Ömerli Alyans Taş Ocağı’ndan temin edilen doğal agrega ve Bolu Çimento Sanayi AŞ’den temin edilen çimento kullanılmıştır.

Kullanılacak malzemelerin özellikleri ile karışım oranlarının belirlenmesinde ve karıştırma işlemlerinde Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013 kıstas alınmıştır.

5.1. Karayolu Teknik Şartnamesine Göre Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) Tabakasının Özellikleri

EAF cürufu ve doğal agrega üzerinde yapılan fiziksel özelliklerin belirlenmesine ilişkin deneyler ile bu malzemeler kullanılarak KTŞ 2013’e göre tasarlanan ÇBGT tabakası için yapılması gereken deneyler ve standartları bu bölümde belirtilmiştir. Malzeme özellikleri, karışım oranları ve karıştırma işlemlerinin şartnameye göre nasıl olması gerektiği açıklanmıştır.

5.1.1. Malzeme özellikleri

ÇBGT tabakası, çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak, Çizelge 5.1’de verilen granülometri limitleri içinde sürekli granülometriye sahip malzemenin uygun çimento ve su oranları ile bir plentte karıştırıldıktan sonra alttemel tabakası üzerine, bir veya daha fazla tabakalar halinde, projede verilen plan, profil ve enkesitlere uygun şekilde serilip sıkıştırılmasıyla oluşan tabakadır.

ÇBGT tabakasında kullanılacak kaba agregalar (4,75 mm elek üzeri) Çizelge 5.2’de verilen özelliklere sahip olmalıdır. Kaba agrega içerisinde donmuş malzeme veya herhangi yabancı malzeme bulunmamalı, kullanılacak ince agrega ise Çizelge 5.3’de verilen özellikleri sağlamalıdır.

Çizelge 5.1 :ÇBGT tabakası granülometri limitleri[39]

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	in, No	Alt limit	Üst limit
37,5	1 1/2"	100	100
25	1"	72	100
19	3/4"	60	92
9,5	3/8"	40	75
4,75	No.4	30	60
2	No.10	20	45
0,425	No.40	8	25
0,075	No.200	0	10

Çizelge 5.2 :Kaba agreganın fiziksel özellikleri [39]

Deney adı	Şartname limiti	Deney standardı
Hava etkilerine karşı dayanıklılık, MgSO4 ile kayıp, %	≤ 20 (MS ₂₀)	TS EN 1367-2
Parçalanma direnci (Los Angeles), %	≤ 35 (LA ₃₅)	TS EN 1097-2* AASHTO T-96
Kil toprakları ve dağılabilen tane oranı, %	$\leq 1,0$	ASTM C-142
Yassılık indeksi, %	≤ 30 ≤ 25 (FI ₂₅)	BS 812 TS EN 933-3*
Organik madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 15.1)
Özgül ağırlık ve su emme, %	$\leq 3,0$ (WA ₂₄₃)	TS EN 1097-6 (Madde 8)

* Referans Metot

Çizelge 5.3 : İnce agreganın fiziksel özellikleri [39]

Deney adı	Şartname limiti	Deney standardı
Likit limit, %	NP	TS 1900-1 AASHTO T 89
Plastisite indeksi, %	NP	TS 1900-1 AASHTO T 90
Organik madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 15.1)
İnce agreganın Metilen mavisi, 0,2 mm'lik kısmına MB, g/kg	$\leq 3,0$ (MB _{3,0}) $\leq 4,5$ (MB _{4,5})* $\leq 4,5$ (MB _{4,5})*	TS EN 933-9

* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.

TS EN 197-1’de belirtilen standartlara uygun olan çimento, agreganın suda çözünen sülfat miktarına bağlı olarak seçilmelidir. Çizelge 5.4’de, sülfat içeriğine bağlı olarak kullanılacak çimento tipleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.4 : Sülfat içeriğine bağlı olarak kullanılacak çimento tipleri [39]

Agregada Suda Çözünen Sülfat Miktarı, mg / kg	
(TS 3440)	Çimento Tipi
< 300	TS - 19
	TS - 20
	TS - 26
300 - 1000	TS - 20
	TS - 26
	TS - 809
≥ 1000	(Tip-5 ASTM C - 150)

ÇBGT tabakası yapımında kullanılacak olan su, asit, yağ, tuz, alkali gibi endüstri atıkları ve bitkisel atıklar içermemelidir.

5.1.2. Karışım oranları

ÇBGT tabakası için hazırlanacak karışımın çimento (%) ve optimum su içeriği (%) oranları “Çimento Bağlayıcı Granüler Temel Karışım Dizaynı” yapılarak tespit edilmelidir.

TS 1900-1 standardına göre yapılan Modifiye Proktor deneyi ile bulunan optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın en az %98’inde 15,24 cm çapında, 17,78 cm yüksekliğindeki CBR kalıbı içerisinde, Modifiye Proktor tokmağı ile 7 tabaka halinde ve her tabakaya 62 darbe vurularak hazırlanan briketlerin 7 gün kürden sonra yapılacak test sonucunda serbest basınç dayanımları 35 kg/cm²’den az, 55 kg/cm²’den fazla olmaması gerekmektedir.

5.1.3. Karıştırma

ÇBGT tabakası karışımının hazırlanması sırasında agrega, su ve çimento beslemesinde kesiklik ve düzensizlik olmamalı, karıştırma süresi karışımın homojenliğine göre belirlenmelidir.

Karışımın su içeriği, TS 1900-1 standardına göre yapılan Modifiye Proktor deneyi ile bulunan optimum su içeriğinden az veya bu değerin üzerinde +0,5’den fazla olmamalıdır.

Karışıma su ilave edildiğinde çimento topaklarının oluşmasını önlemek için agrega ve çimento daha önce yeteri kadar karıştırılmalıdır.

5.2. Uygulanan Deneyler

ÇBGT tabakasında EAF cürufunun kullanımının incelenmesi için uygulanan deneyler, EAF cürufu ve doğal agrega üzerinde ayrı ayrı yapılan fiziksel özelliklerin belirlenmesine ilişkin deneyler ile bu malzemeler kullanılarak KTŞ 2013'e göre tasarlanan ÇBGT tabakası için yapılan deneyler olarak bu bölümde anlatılmıştır.

5.2.1. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneyler

EAF cürufu ve doğal agrega numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için, numunelere uygulanan özgül ağırlık ve su emme, Los Angeles aşınma kaybı, yassılık indeksi, organik madde içeriği, metilen mavisi, kil topağı ve dağılabilen tane oranı, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, likit limit ve plastik limit deneyleri ve bu deneylerde kullanılan ekipman bu bölümde tanıtılmıştır. Yapılan tüm deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi laboratuvarlarında (Ulaştırma ve Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında) gerçekleştirilmiştir.

5.2.1.1. Özgül ağırlık ve su emme (absorpsiyonu) deneyi

EAF cürufunun ve doğal agreganın TS EN 1097-6 standardına göre su emme ve özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Standartta belirtildiği şekilde, kaba ve ince agregalar için deneyler ayrı ayrı uygulanmıştır.

Kaba agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi

Hazırlanan numuneler (4-37,5 mm elekler arası malzemeler) yıkandıktan sonra tel sepete yerleştirilmiştir. Hapsolmuş havayı agregadan tamamen uzaklaştırmak için suya daldırılıp çıkarılan sepet, agregalar ile su içinde 24 saat bekletilmiş ve Şekil 5.1'de görüldüğü gibi su içinde tartılmıştır (M_2). Sepet ve agrega sudan çıkarıldıktan sonra agregalar kuru bir bez üzerine boşaltılmış ve yüzeyleri dikkatlice kurutulmuştur (Şekil 5.2). Yüzeyi kuru suya doymuş agregalar tartılmıştır (M_1). Ayrıca boş sepet de su içerisinde tekrar tartılmıştır (M_3). Agrega taneleri 110 ± 5 °C'lik etüvde 24 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları ölçülmüştür (M_4).



Şekil 5.1 : Tel sepet ile numunelerin su içinde tartılması



Şekil 5.2 : Doygun kuru yüzey özgül ağırlık tayini

Özgöl ağırlık değerleri ve su emme yüzdesi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır[40].

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı: } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (5.1)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlığı: } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.2)$$

$$\text{Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı: } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.3)$$

$$\text{Su emme (Absorpsiyonu) (\%): } WA_{24} = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5.4)$$

İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi

0,063 mm ile 4 mm açıklıklı elekler arasında kalan malzeme eleme işleminin ardından yıkanmış ve kurutulmuştur. Piknometre içi damıtık su ile tamamen dolu şekilde, piknometrenin dış yüzeyi kurutulduktan sonra tartılmıştır (M_3). Daha sonra su boşaltılmış, numune bir huni yardımı ile piknometreye konulmuş ve üzerine damıtık su ilave edilerek 24 saat bekletilmiştir. İçeride hapsolmuş hava Şekil 5.3’de görüldüğü gibi vakum uygulamak sureti ile uzaklaştırılmıştır. Üst kısmı berrak bir görünüm alana kadar beklenmiş ve piknometreye damıtık su ilave edilerek taşacak şekilde doldurulmuştur. Dış kısmı kurutulduktan sonra tartılmıştır (M_2). Numune piknometre içinden çıkarılıp yüzey rutubeti buharlaştıktan sonra tartılmıştır (M_1). Ardından 110 ± 5 °C’lik etüvde sabit kütleye kadar kurutulup tekrar ağırlığı ölçülmüştür (M_4).



Şekil 5.3 : Piknometre içinde kalan havanın boşaltılması

Özgöl ağırlık değerleri ve su emme yüzdesi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır[40].

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı: } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (5.5)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlığı: } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.6)$$

$$\text{Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı: } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.7)$$

$$\text{Su emme (Absorpsiyonu) (\%): } WA_{24} = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5.8)$$

5.2.1.2. Los Angeles aşınma deneyi

ASTM C131 standardına göre yapılan bu deneyde cüruf ve doğal agreganın aşınmaya karşı dayanıklılığı belirlenmiştir. Cüruf ve doğal agregada standartta belirtilen numune sınıflarına göre B sınıfı seçilmiştir. 19-12,5 mm elek arası 2500 gr, 12,5-9,5 mm elek arası 2500 gr olmak üzere 5000 gr malzeme yıkanmış ve etüve konmuştur. 24 saat 110±5 °C’lik etüvde bekletildikten sonra 10 gr tolerans ile 5000 gr cüruf ve 5000 gr doğal agregada numunesi hazırlanmış ve tartılmıştır (A). Standartta belirtilen 11 adet çelik küre ile birlikte numune Los Angeles aşınma makinasına konmuş ve kapağı sıkıca kapatılmıştır. Dakikada 30-33 hız ile 500 devir yaptırılmış ve numune makinadan çıkarılmıştır. Şekil 5.4’de Los Angeles aşınma makinası ile yapılan 500 devir sonrası elde edilen numuneler gösterilmiştir.

Makinadan çıkarılan numuneler 12 No.’lu elekten (1,68 mm) elenmiştir. Elek üstünde kalan kısım yıkanmış ve 110±5 °C’lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Uygulanan bu işlemler Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Daha sonra kuruyan numune tekrar tartılmıştır (B).

Denklem 5.9 ile numunelerin aşınma kayıpları bulunmuştur.

$$\text{Los Angeles Aşınma Kaybı (\%)} = \frac{A-B}{A} 100 \quad (5.9)$$

Denklemde,

A: İlk ağırlık

B: Son ağırlık [41].



Şekil 5.4 : Los Angeles aşınma deneyi



Şekil 5.5 : Makinadan çıkarılan ve elenen numuneler

5.2.1.3. Yassılık indeksi deneyi

Yassılık indeksi deneyinde BS 812-105.2 standardı kullanılarak agregalardaki yassı madde oranını belirlemek için yapılmıştır. Standartta verilen elek aralıkları kullanılarak numuneler bu aralıklarda ayrılmıştır. Her elek üzerinde kalan malzeme yıkanmış, etüvde kurutulduktan sonra ayrı ayrı tartılmış ve numunelerin toplam

ağırlığı hesaplanmıştır (M_1). Daha sonra numuneler bulunduğu elek aralığına göre silindirik çubuklu eleklerden elenmiştir (Şekil 5.6). Eleklerden geçen malzemelerin ayrı ayrı ağırlıkları ölçülmüş ve deney föyüne yazılmıştır. Ardından silindirik çubuklu eleklerden geçen numunelerin toplam ağırlığı belirlenmiştir (M_2).



Şekil 5.6 : Yassılık indeksi deneyi

Aşağıdaki bağıntı ile yassılık indeksi hesaplanmıştır.

$$\text{Yassılık indeksi (\%)} = \frac{M_2}{M_1} 100 \quad (5.10)$$

Denklemden,

M_1 : Deneyde kullanılan toplam malzeme ağırlığı (gr)

M_2 : Silindirik çubuklu eleklerden geçen toplam malzeme ağırlığı (gr) [42].

5.2.1.4. Organik madde içeriği deneyi

Hayvansal ve bitkisel atıkların çürümesi ile oluşan zararlı maddeler organik madde olarak adlandırılır. Bu deneyde TS EN 1744-1 (Madde 15.1) standardına göre numunenin sodyum hidroksit çözeltisinde çalkalandığı zaman oluşan renkten agregasında organik madde bulunup bulunmadığı tayin edilmiştir. Bunun için 1 lt su içerisinde 30 gr NaOH çözülerek %3'lük NaOH çözeltisi hazırlanmıştır. 40 ± 5 °C'lik etüvde kurutulan numune 4 mm göz açıklı elekten elenmiş ve elekten geçen taneler muhafaza edilmiştir. Cam bir şişeye 80 mm yüksekliğe kadar %3'lük NaOH çözeltisi konulmuş, takiben çözelti ve agreganın yüksekliği 120 mm oluncaya kadar da bir miktar

deney numunesi eklenmiştir (Şekil 5.7). Hava kabarcıklarının çıkması için çalkalanmış ve kapağı sıkıca kapatılarak 1 dakika kuvvetlice çalkalandıktan sonra 24 saat beklemeye bırakılmıştır.



Şekil 5.7 : Organik madde içeriği deneyi

Bu yöntem, organik maddelerin NaOH ile reaksiyona girmesi ile gelişen koyu renge dayanmaktadır. Rengin yoğunluğu organik madde miktarına bağlıdır. Çözelti berraksa veya hafifçe renklenirse kayda değer miktarda organik madde bulunmadığı kabul edilmektedir. Güçlü bir renk değişimi ise, zararlı miktarda organik madde bulunduğunun göstergesidir [43].

5.2.1.5. Metilen mavisi deneyi

TS EN 933-9 standardına göre yapılan metilen mavisi deneyinin amacı, agreganın 0,063 mm göz açıklı elekten geçen ince tanelerin içinde bulunan kil içeriğinin belirlenmesidir. Metilen mavisi su içinde çözündüğü zaman, çözelti içinde metilen mavisi katyonları ve klorit anyonları oluşmaktadır. Kil numunesi karışıma girdiği zaman, klorit iyonları kil mineral yüzeyleri ile birleşmiş var olan katyonlarla yer değiştirip kil parçacıklarının yüzeyi metilen mavisi ile kaplanmaktadır [45].

Doğal agrega ve EAF cürufundan, 0-2 mm tane büyüklüğüne sahip en az 200 gr olacak şekilde her bir malzemeden 2 farklı numune hazırlanmıştır. Numunelerden biri (M), etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulmuş ve tartılmıştır (M'). Aşağıdaki formüller ile doğal agrega ve EAF cürufu için önce su içeriği ayrı ayrı hesaplanmış ve kullanılacak diğer numunenin kuru ağırlığı (M_1) belirlenmiştir.

$$W (\%) = \frac{M - M'}{M'} 100 \quad (5.11)$$

$$M_1 = \frac{Mo}{1 + W/100} \quad (5.12)$$

Denklemde,

M_0 = Test numunesinin ağırlığı [44].

500 ml damıtık su behere konulduktan sonra üzerine deney numunesi eklenmiştir. Şekil 5.8’de verilen deney düzeneğindeki karıştırıcı ile 600 devir/dakika hız ile 5 dakika karıştırılmıştır. Daha önce hazırlanan metilen mavisi boya çözeltisi (10 g/l) 5ml olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir. Beherdeki malzemeler 400 devir/dakika hız ile 1 dk karıştırılmış ve süzgeç kağıdı üzerine cam çubuk ile damla bırakılmıştır. Bu damlanın çapının 8 ile 12 mm arasında olması gerekmektedir ve damlanın etrafında en az 1 mm açık mavi halka meydana gelmesi gerekmektedir. Bu halka oluşuncaya kadar karışıma, çözelti ekleme ve süzgeç kağıdına damla bırakma işlemleri devam etmiştir. 5 dk süre ile varlığını sürdüren halkayı meydana getirmek için ilave edilen boya çözeltisinin hacmi (V_1) kaydedilmiştir.

Aşağıdaki formül ile 0-2 mm tane büyüklüğü aralığının beher kilogramı başına tüketilen boyanın gram cinsinden ifadesi olan metilen mavisi değeri (MB) hesaplanmıştır.

$$MB = \frac{V_1}{M_1} 10 \quad (5.13)$$

Denklemde,

M_1 = Deney numunesinin kütlesi (gr)

V_1 = İlave edilen boya çözeltisinin hacmi (ml) [44].



Şekil 5.8 : Metilen mavisi deney düzeneği

5.2.1.6. Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi

ASTM C-142 standardına göre yapılan deneyde elek aralıkları ince ve kaba agregalar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Çizelge 5.5’de belirtildiği şekilde ince agregalar 1,18 ile 4,75 mm elekler arası olarak alınırken kaba agregalar 4,75-9,5 mm, 9,5-19 mm ve 19-37,5 mm elek aralıkları ile üç farklı grup olarak sınıflandırılmıştır. Bu elek aralıklarında hazırlanan EAF cürufu ve doğal agregalar numuneleri 110 ± 5 °C etüvde kurutulduktan sonra tartılmış ve ilk kuru ağırlık olarak deney föyüne yazılmıştır (A). Her bir elek aralığı ayrı ayrı kaplarda su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Bekletilen numuneler Çizelge 5.5’de verilen eleklerden su altında yıkanmış ve elenmiştir. Böylece kil topakları ve dağılabilen tanelerden arındırılmıştır. Şekil 5.9’de suda bekletilen numuneler ile daha sonra numunelerin elekler ile su altında yıkanma işlemi gösterilmiştir. Elek üstünde kalan malzeme tekrar 110 ± 5 °C’lik sabit ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutularak tartılmış ve son kuru ağırlık olarak deney föyüne yazılmıştır (B).

Çizelge 5.5 : Numune tane boyutlarına karşılık gelen elek boyutları

Numune Tane Boyutları (mm)	Kil Topağı ve Dağılabilen Taneleri Gidermek İçin Kullanılan Elekler
İnce Agregası 1,18-4,75	0,85 mm (No. 20)
Kaba Agregası 4,75-9,5	2,36 mm (No. 8)
9,5-19	4,75 mm (No. 4)
19-37,5	4,75 mm (No. 4)

Aşağıdaki bağıntı ile kil toprakları ve dağılabilen tane oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Dağılabilen tane oranı (\%)} = \frac{A-B}{A} 100 \quad (5.14)$$

Denklemde,

A: İlk Kuru Ağırlık

B: Son Kuru Ağırlık



Şekil 5.9 : Kil toprakları ve dağılabilen tane oranı deneyi

5.2.1.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi

TS EN 1367-2 standardına göre yapılan bu deneyde, agregası üzerinde küçük malzemelerin oluşmasına neden olan zararlı hava etkilerinin sebep olduğu ufalanma ölçülmektedir [47].

EAF cürufu ve doğal agregası için tane boyutu 10 mm ile 14 mm arasında 500 gr ağırlığında 2 agregası numunesi yıkanmış ve 110±5 °C'lik etüvde 24 saat

kurutulmuştur. Kuruduktan sonra tekrar elenerek tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir (A). Daha sonra her bir numune $17\pm0,5$ saat süre ile magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Numune çıkarıldıktan sonra suyu süzölmüş, 110 ± 5 °C’lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulmuştur (Şekil 5.10). Bu döngü 5 kez tekrarlanıp soğutma işlemi yapıldıktan sonra yıkama suyunda magnezyum sülfat kalmayınca kadar numuneler musluk suyunda yıkanmıştır. Her bir deney numunesi 110 ± 5 °C’lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve 10 mm’lik elek ile elenmiştir. Elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır (B). İlk ağırlık ile son ağırlık arasındaki fark bize donma kaybını vermektedir. Hazırlanan 2 ayrı numune için bu kayıpların ilk ağırlığa göre yüzde olarak hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır.

Aşağıdaki bağıntı ile donma kaybı yüzdesi hesaplanmıştır,

$$\text{Donma kaybı(\%)} = \frac{A-B}{A} 100 \quad (5.15)$$

Denklemde,

A: İlk kuru ağırlık

B: Son kuru ağırlık



Şekil 5.10 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi

5.2.1.8. Likit limit ve plastik limit deneyi

Plastik limit deneyi, zeminin plastik kıvamda olduğu durumdaki en düşük su içeriğini belirlemek amacı ile yapılmaktadır [48]. Deney TS 1900-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 40 No'lu elekten (0,425 mm) geçen yaklaşık 20 gr numune bir miktar su ile homojen bir kıvama gelene kadar karıştırılıp yoğurulmuştur. Cam bir levha üzerinde, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar el ile yuvarlanmıştır (Şekil 5.11). 10 mm uzunluğundaki bir silindir şeklini kazandığında, kırılıp çatlamaların meydana geldiği andaki su içeriği, zeminin plastik limiti olarak değerlendirilmektedir [48].



Şekil 5.11 : Plastik limit tayini

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre, EAF cürufunun ve doğal agreganın plastik özellik göstermediği belirlenmiştir. Bu sebeple likit limit deneyi yapılamamıştır.

5.2.2. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasına uygulanan deneyler

Bu bölümde Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakası için yapılan deneyler açıklanmıştır. KTŞ 2013'de ÇBGT için belirtilen granülometri alt ve üst limit değerleri ile bu değerlerin ortalaması alınarak tasarım değerleri hesaplanmış ve üç farklı granülometri eğrisi elde edilmiştir. Hazırlanan farklı granülometrideki doğal agrega ve EAF cürufu numuneleri için Modifiye Proktor deneyi ile optimum su

muhtevası belirlenmiş ve CBR deneyleri yapılmıştır. Ardından, farklı çimento oranları ile serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler KTŞ 2013’de istenilen standartlara göre yapılmış ve elde edilen sonuçlar şartnamedeki limit değerler ile kıyaslanmıştır.

5.2.2.1. Modifiye proktor deneyi

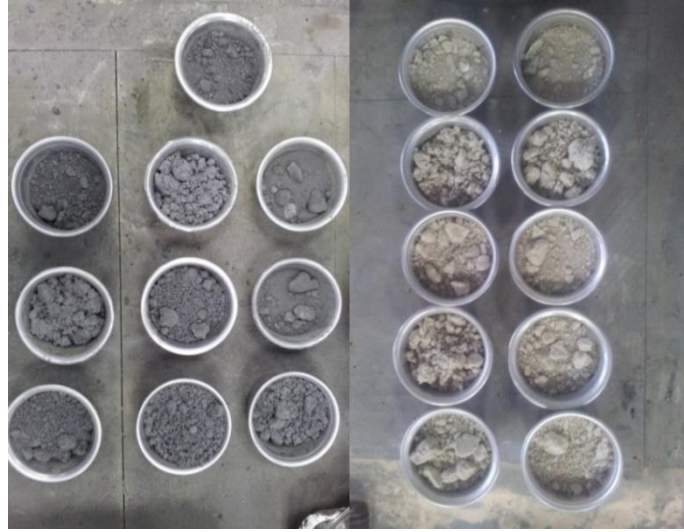
Kuru birim hacim ağırlığı ile optimum su muhtevası arasındaki ilişki TS 1900-1 Standardına uygun olarak Modifiye proktor deneyi ile belirlenmiştir. Deneyde kullanılmak üzere hazırlanan numunelerde 19 mm elek üstü malzeme ağırlıkları oranınca 19 mm elek altındaki eleklerle dağıtılmış, 110 ± 5 °C’lik etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Numuneler, 152,4 mm çapındaki kalıpta 5 eşit tabakada ve her tabaka 4,5 kg’lık tokmak ile 45 cm yükseklikten 56 darbe uygulanacak şekilde sıkıştırılmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 : Modifiye proktor deneyi

Sıkıştırmadan sonra, kalıbın üst kısmı çıkarılmış, düzeltilmiş ve ağırlığı kaydedilmiştir. Sıkıştırılan malzeme kalıptan çıkarıldıktan sonra rutubet numuneleri alınmıştır. Her sıkıştırma işleminin ardından 2 adet rutubet numunesi alınarak tartılmıştır. Beş kez yapılan sıkıştırma işleminin ardından 10 adet rutubet numunesi elde edilmiştir (Şekil 5.13). Rutubet numuneleri 110 ± 5 °C’lik etüvde 24 saat

bekletildikten sonra tartılmış ve hesaplamalar için gerekli tüm veriler deney föyüne işlenmiştir.



Şekil 5.13 : EAF cürufu ve doğal agrega rutubet numuneleri

5.2.2.2. CBR deneyi (Kaliforniya taşıma oranı)

CBR Deneyi ASTM D-1883 standardına uygun olarak, 19 mm cüruf ve doğal agrega, ağırlıkları oranınca 19 mm altı eleklerle dağıtılarak yapılmıştır. Silindirik pistonun sıkıştırılmış zemin numunesine itilerek yük-penetrasyon bağıntısının bulunması sağlanmıştır. CBR değeri, penetrasyon değeri için ölçülen yükün, standart malzemedeki yüke oranıdır. CBR deney düzeneği Şekil 5.14’da verilmiştir.



Şekil 5.14 : CBR deney aleti

CBR Deneyi için etüvde kurutulan numuneler üzerine Modifiye proktor deneyi ile bulunan optimum su muhtevasını sağlayacak şekilde su ilave edilmiştir. 15,24 cm çapında ve 17,78 cm yüksekliğinde standart CBR kalıbının tabanına metal disk ve bu metal diskin üzerine süzgeç kağıdı yerleştirilmiştir. CBR numunesi her bir tabakaya 4,5 kg'lık tokmak ile 45 cm yükseklikten 56 darbe vurularak, 5 tabaka halinde sıkıştırılmıştır.

CBR değerleri 2,5 mm ve 5,0 mm'lik değerlerde hesaplanmış ve yüksek olan değer CBR değeri olarak kabul edilmiştir.

5.2.2.3. Serbest basınç dayanımı (tek eksenli basınç) deneyi

Çimento türü bir bağlayıcı ile stabilize edilen temel tabakasının kalitesi serbest basınç deneyi yapılarak tespit edilmektedir. Çimento bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) tabakası için de bu deney uygulanmıştır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılmış ve silindir şeklinde numuneler hazırlanmıştır.

Kullanılacak çimentonun seçimi Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013'de belirlenen "sülfat içeriğine bağlı olarak kullanılacak çimento tiplerinden" yapılmıştır. Çünkü daha önce yapılan çalışmalarda Kocaeli'de bulunan Çolakoğlu Tesislerinden alınan EAF cürufunda suda çözünen sülfat (SO_4^{-2}) miktarı 260 mg/kg, Ömerli Alyans Taş Ocağı'ndan temin edilen doğal agreganın ise 50 mg/kg'dan az olduğu belirlenmiştir. Çimentonun seçimi KTŞ 2013'de verilen Çizelge 5.4'e göre yapılmıştır.

Kullanılacak çimentonun TS EN 197-1'de belirlenen şartlara uyması gerekmektedir [39]. Çizelge 5.4'de yer alan çimento türleri 2004 yılında yürürlüğe giren TS EN 197-1 standardı ile değişmiş fakat KTŞ 2013'de güncellenmemiştir. TS EN 197-1 standardı ile 2004 yılında yürürlükten kalkan çimento türleri Çizelge 5.6'de verilmiştir. Son olarak 2012 yılında güncellenen TS EN 197-1 standardında belirtilen sülfata dayanıklı çimento ailesi Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bu veriler ışığında ÇBGT tabakasında kullanılacak çimento olarak CEM III/B çimentosu seçilmiştir.

Çizelge 5.6 : Yürürlükten kalkan çimento türleri [52]

Yürürlükten kalkan standartlar		TS EN 197-1'deki benzerleri	
Standart no ve isim	İsim	Notasyon	Anabileşen katkı, %
TS 19 Portland Çimentosu	Portland Çimento	CEM I	0-5
TS 20 Cürüflu Çimento	Portland Cürüflu Çimento	CEM II/B-S	21-35
	Yüksek Fırın Cürüflu Çimento	CEM III/A	36-65
		CEM III/B	66-80
TS 26 Traslı Çimento	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/B-P	21-35
TS 640 Uçucu Küllü Çimento	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	6-20
TS 809 Süper Sülfat Çimentosu		CEM II/B-V	21-35
	Yüksek Fırın Cürüflu Çimento	CEM III/B	66-80
TS 3646 Erken Dayanımı Yüksek Çimento		CEM III/C	81-95
	Portland Çimento	CEM I/52.5R	0
TS 10156 Katkılı Çimento	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	6-20
TS 12139 Portland Cürüflu Çimento	Portland Cürüflu Çimento	CEM II/A-S	6-20
		CEM II/B-S	21-35
TS 12140 Portland Kalkerli Çimento	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	6-20
		CEM II/B-L	21-35
TS 12141 Portland Silika Füme	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	6-10
TS 12142 Kompoze Çimento	Kompoze Çimento	CEM V/A	18-30
		CEM V/B	31-50
TS 12143 Portland Kompoze Çimento	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	6-20
		CEM II/B-M	21-35
TS 12144 Puzolanik Çimento	Puzolanik Çimento	CEM IV/A-M	11-35
		CEM IV/B-M	36-55

Çizelge 5.7 : Sülfata dayanıklı çimento ailesi [51]

Ana Tipler	Sülfata dayanıklı genel çimento tipleri	
CEMI	Sülfata dayanıklı portland çimentosu	CEM I-SR 0
		CEM I-SR 3
		CEM I-SR 5
CEM III	Sülfata dayanıklı yüksek fırın cürüflu çimento	CEM III/B-SR
		CEM III/C-SR
CEM IV	Sülfata dayanıklı puzolanik çimento	CEM IV/A-SR
		CEM IV/B-SR

Her numune için agrega 110 ± 5 °C'lık etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Ardından farklı oranlarda çimento, agrega karışımına eklenmiştir. Karışımın hazırlanması sırasında çimento topaklarının oluşmaması için agrega ve çimento daha önce yeteri kadar karıştırılmıştır (Şekil 5.15). Karışıma eklenecek su miktarı, Modifiye Proktor deneyi ile bulunan optimum su içeriği değerinden 0,5 fazlası olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir [39].



Şekil 5.15 : Karışımın hazırlanması

Numuneler, KTŞ 2013'de belirtilen 15,24 cm çapında, 17,78 cm yüksekliğindeki CBR kalıbı içerisinde, 4,5 kg'lık Modifiye Proktor tokmağı ile 7 tabaka halinde ve her tabakaya 62 darbe vurularak hazırlanmıştır. Prizini aldıktan sonra, 7 gün kür havuzunda bekletilmiştir.

Hazırlanan silindir numuneler, yüksek kapasiteli beton presinde test edilmiştir. Deney ile silindirik numunenin yenilmesi anında, birim alana etkiyen yük bulunmaktadır. Deney mekanizması Şekil 5.16'de gösterilmiştir.

Serbest basınç deneyi ASTM-D1366 deney standardına göre gerçekleştirilerek Denklem 5.16 ile serbest basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$Q = P_{maks} / A \quad (5.16)$$

Denklemde,

Q: Serbest basınç dayanımı (kg/cm^2)

P_{maks} : Yenilme yükü (kg)

A: Numunenin kesit alanı (cm^2)



Şekil 5.16 : Serbest basınç deney mekanizması

5.3. Deneysel Bulgular

EAF cürufu ve doğal agreg a üzerinde ayrı ayrı yapılan fiziksel özelliklerin belirlenmesine ilişkin deneyler ile ÇBGT tabakası için yapılan deneylerin sonuçları bu bölümde verilmiştir.

5.3.1. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneylerin sonuçları

Bu bölümde EAF cürufu ve doğal agreganın fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesine ilişkin yapılan deneylerin sonuçları ile bu deney sonuçlarının Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de verilen limit değerler ile karşılaştırılması yer almaktadır.

5.3.1.1. Özgöl ağırlık ve su emme (absorpsiyonu) deneyi sonuçları

EAF cürufu ve doğal agreg a üzerine yapılan kaba ve ince agregalar için özgöl ağırlık deney sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. EAF cürufun ince ve kaba agreg a özgöl ağırlık deney sonuçları doğal agregadan fazla çıkmıştır. Demir oranının yüksek olması bu duruma neden olmaktadır.

Çizelge 5.8 : Özgül ağırlık deney sonuçları

Numune	Zahiri Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Kuru Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	DKY Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
EAFCürufu			
Kaba Agregası	3,53	3,28	3,35
İnce Agregası	3,55	3,26	3,34
Doğal Agregası			
Kaba Agregası	2,86	2,82	2,84
İnce Agregası	2,89	2,84	2,86

Su emme değerleri özellikle donma bölgelerindeki malzemeler için önemli bir parametredir. Yüksek oranda su emen agregalar donma-çözülme sürecinde parçalanmakta ve granülometrileri değişmektedir. EAF cürufun su emme değerleri doğal agreganın su emme değerlerinden fazladır. EAF cürufun pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip olması su emme oranlarının yüksek çıkmasına neden olmuştur. Çizelge 5.9’da kaba ve ince agrega için su emme deney sonuçları verilmiştir. Burada EAF cürufu ve doğal agrega için elde edilen değerler ile KTŞ 2013 limit değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen su emme değerleri KTŞ 2013 limit değerlerinin altındadır.

Çizelge 5.9 : Su emme deney sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Su Emme (Absorpsiyonu) (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAFCürufu		
Kaba Agregası	2,16	3
İnce Agregası	2,48	3
Doğal Agregası		
Kaba Agregası	0,46	3
İnce Agregası	0,60	3

5.3.1.2. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

Yol inşaatında kullanılan agreganın aşınmaya karşı mukavemete sahip olması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonucunda EAF cürufu ve doğal agrega için elde edilen aşınma oranları ile KTŞ 2013 limit değerleri Çizelge 5.10’da verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, EAF cürufu ve doğal agrega aşınma oranlarının limit değerleri aşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, ağır trafik yükleri altında dahi tane büyüklüğü dağılımının değişmeyeceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.10 : Los Angeles aşınma deney sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Los Angeles Aşınma Değerleri (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAF Cürufu	23	35
Doğal Agregası	17	35

5.3.1.3. Yassılık indeksi deneyi sonuçları

Yassı taneler yapıda zayıf bölgeler oluşturarak hasara sebep olmaktadır. Çizelge 5.11’de EAF cürufu ve doğal agreganın yassılık oranlarının, KTŞ 2013 limit değerleri ile kıyas tablosu verilmiştir. Bu tabloya göre EAF cürufu ve doğal agregası numuneleri için şartname değerlerinin sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 5.11 : Yassılık indeksi sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Yassılık İndeksi (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAF Cürufu	4,63	30
Doğal Agregası	9,30	30

5.3.1.4. Organik madde içeriği deneyi sonuçları

KTŞ 2013’de hem kaba agregada hem de ince agregada organik madde bulunmaması gerektiği belirtilmektedir.

Yapılan deney sonucunda, EAF cürufu ve doğal agregada kaba tanelerinde organik madde görülmemiştir. İnce malzeme için yapılan deney sonucunda, çözeltide renk değişimi olmaması organik madde bulunmadığını göstermiştir. Çizelge 5.12’de deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Organik madde içeriği sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	NaOH Çözeltisi ile Renk Değişimi	Organik Madde İçeriği (%)	KTŞ Limitleri
EAF Cürufu			
Kaba Agregası	-	0	Negatif
İnce Agregası	Yok	0	Negatif
Doğal Agregası			
Kaba Agregası	-	0	Negatif
İnce Agregası	Yok	0	Negatif

5.3.1.5. Metilen mavisi deneyi sonuçları

EAF cürufu 600 devir/dakika hız ile 5 dakika karıştırıldıktan sonra 5ml çözelti karışıma ilave edilmiş ve 400 devir/dakika hız ile 1 dakika daha karıştırılmış ve süzgeç kağıdına damla bırakılmıştır. İnce bir halka oluşumu gözlenmiştir. Bundan sonraki iki çözelti ilavesi 1 ml şeklinde olmuş ve 400 devir/dakika karıştırılmıştır. Halkanın kalınlığı 1 mm'ye ulaştığında ise teyitler yapılmıştır.

Doğal agregata ile yapılan metilen mavisi deneyinde ise halkanın ilk görünümü 600 devir/dakika hız ile 5 dakika karıştırıldıktan sonra çözeltinin ilavesi edilmiş ve halkanın görünümü ince bir şekilde 10 ml çözeltiden sonra olmuştur. Ardından 1 ml çözelti ilavesi ile halka belirginleştirilmiştir. Her iki numune için de eklenen çözelti miktarına karşılık süzgeç kağıdı üzerinde elde edilen damla ve halkalar Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Damlaların süzgeç kağıdı üzerindeki görünüşleri

EAF cürufu için 7 ml çözeltide halka elde edilmiş, doğal agregada ise 11 ml çözelti ilavesi gerçekleşmiştir.

İnce taneler içinde bulunan kil miktarının belirlenmesi amacı ile yapılan metilen mavisi deneyi ile elde edilen EAF cürufu ve doğal agregata için metilen mavisi değerleri ile KTŞ 2013 limit değerleri Çizelge 5.13'de verilmiştir. Buna göre hem EAF cürufu hem de doğal agregata MB değerleri şartname değeri olan 3 g/kg'ın altında kalarak koşulları sağlamıştır.

Çizelge 5.13 : Metilen mavisi deney sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Metilen mavisi değeri (MB) (g/kg)	KTŞ Limitleri (g/kg)
EAF Cürufu	0,33	3
Doğal Agregada	0,52	3

5.3.1.6. Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi sonuçları

Deney sonuçları ve KTŞ 2013 limit değerleri Çizelge 5.14’de verilmiştir. EAF cürufu üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, hem kaba hem de ince tanelerde şartname limitlerinin aşılmadığı görülmüştür. Doğal agregada ise kaba tanelerde şartname limitleri aşılmaz iken ince tanelerde şartname limitleri sağlanamamıştır.

Çizelge 5.14 : Dağılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Dağılabilen Tane Oranı (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAF Cürufu		
Kaba Agregada	0,32	1
İnce Agregada	0,40	1
Doğal Agregada		
Kaba Agregada	0,61	1
İnce Agregada	3,00	1

5.3.1.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi sonuçları

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık özellikle gece ve gündüz ısı farkının fazla olduğu karasal iklim bölgelerinde ve donma bölgelerinde önemli bir etkidir. Bu bölgelerde agregaların emdiği suyun donması sonucu yaptığı hacim genişlemesinin yarattığı ilave gerilmeler ve donma çözülme periyotlarının sıklığı ile agregalar parçalanmaya maruz kalır. Su emme özelliğinin önemli olduğu bu durumda parçalanma sonucu agregaların granülometrisi değiştirmektedir.

Çizelge 5.15’de elde edilen hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi ile kayıp değerleri ve KTŞ 2013 limit değerleri verilmiştir. Hem EAF cürufu ve hem de doğal agregada için şartname değerleri sağlanmıştır. Su emme oranı yüksek çıkan EAF cürufunun donma kaybı da doğal agregadan yüksek çıkmıştır.

Çizelge 5.15 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları ve KTŞ limitleri

Numune	Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi ile Kayıp (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAF Cürufu	9,51	20
Doğal Agregası	2,05	20

5.3.1.8. Likit limit ve plastik limit deneyi sonuçları

EAF cürufu ve doğal agrega numunelerine yapılan plastik limit deneyine göre her iki malzemenin de plastik özellik göstermediği görülmüştür. “*Plastik Olmayan*” (NP - Non Plastic) adı verilen bu sınıfa likit limit deneyi yapılamamıştır. Çizelge 5.16’de deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri karşılaştırılmıştır. Her iki malzeme de istenilen koşulları sağlamıştır.

Çizelge 5.16 : Numune plastisite indeksleri ve KTŞ limitleri

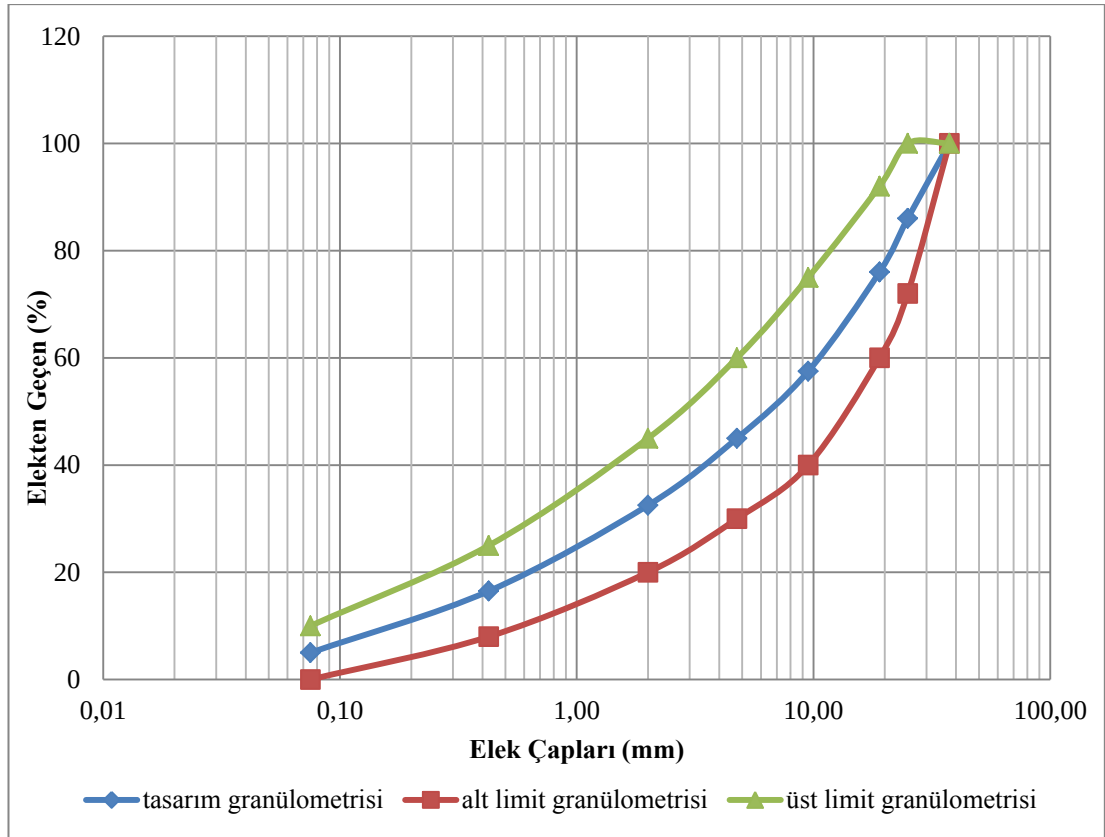
Numune	Plastisite İndeksi (%)	KTŞ Limitleri (%)
EAF Cürufu	NP	NP
Doğal Agregası	NP	NP

5.3.2. Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasına uygulanan deneylerin sonuçları

ÇBGT tabakasına ilişkin yapılan deneylerde 3 farklı granülometri ile çalışılmıştır. KTŞ 2013’de belirtilen granülometri alt ve üst limit granülometreleri ile bunların ortalaması alınarak hesaplanan tasarım granülometrisi Çizelge 5.17’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak, KTŞ’de belirtildiği şekilde sürekli granülometriye sahip elde edilen granülometri eğrileri Şekil 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : ÇBGT’de kullanılan granülometri değerleri

Elek Açıklığı		% Geçen		
mm	in, No	Alt limit	Üst limit	Tasarım
37,5	1 1/2"	100	100	100
25	1"	72	100	86
19	3/4"	60	92	76
9,5	3/8"	40	75	57,5
4,75	No.4	30	60	45
2	No.10	20	45	32,5
0,425	No.40	8	25	16,5
0,075	No.200	0	10	5



Şekil 5.18 : ÇBGT tabakası granülometri eğrileri

5.3.2.1. Modifiye proktor deneyi sonuçları

EAF cürufu ve doğal agreganın alt limit, üst limit ve tasarım granülometrileri için ayrı ayrı yapılan Modifiye proktor deneyi ile su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Bu değerler ile Modifiye Proktor eğrileri çizilmiş, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık sonuçları bulunmuştur.

Çizelge 5.18’de verilen alt limit granülometri değerlerindeki EAF cürufu ve doğal agregaya ait su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.19’de verilmiştir.

Şekil 5.19’da alt limit granülometrisi için EAF cürufu ve doğal agregaya Modifiye Proktor eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur.

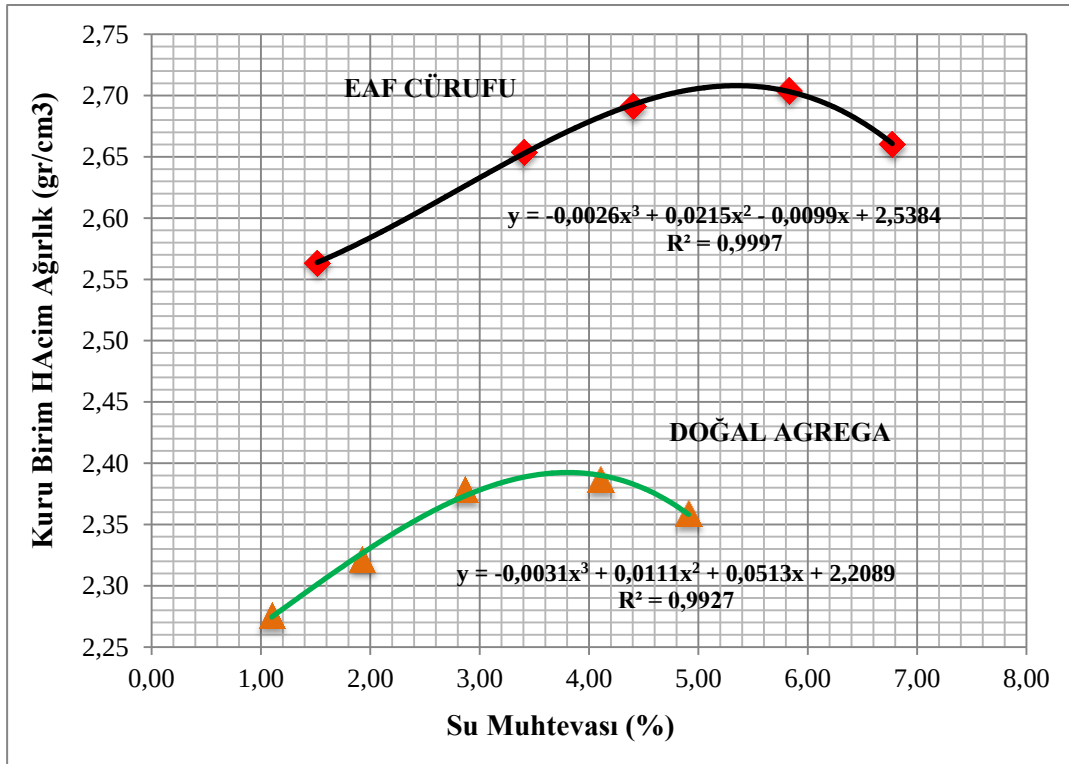
Modifiye Proktor eğrilerine göre alt limit granülometrisi için EAF cürufu optimum su muhtevası %5,27, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,70 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur. Doğal agregaya optimum su muhtevası %3,83, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,39 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.

Çizelge 5.18 : Alt limit granülometri değerleri

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	in, No	Alt limit
37,5	1 1/2"	100
25	1"	72
19	3/4"	60
9,5	3/8"	40
4,75	No.4	30
2	No.10	20
0,425	No.40	8
0,075	No.200	0

Çizelge 5.19 : Alt limit granülometrisinde W - KBHA

EAF Cürufu			Doğal Agrega	
	W (%)	KBHA (gr/cm3)	W (%)	KBHA (gr/cm3)
No. 1	1,52	2,56	1,10	2,28
No. 2	3,41	2,65	1,93	2,32
No. 3	4,41	2,69	2,87	2,38
No. 4	5,83	2,70	4,10	2,39
No. 5	6,77	2,66	4,91	2,36



Şekil 5.19 : Alt limit granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri

Üst limit granülometrisinin elek açıklığı ile bu eleklerden geçen değerler Çizelge 5.20’de verilmiştir. Bu granülometrideki EAF cürufu ve doğal agregaya ait su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 : Üst limit granülometri değerleri

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	in, No	Üst limit
37,5	1 1/2"	100
25	1"	100
19	3/4"	92
9,5	3/8"	75
4,75	No.4	60
2	No.10	45
0,425	No.40	25
0,075	No.200	10

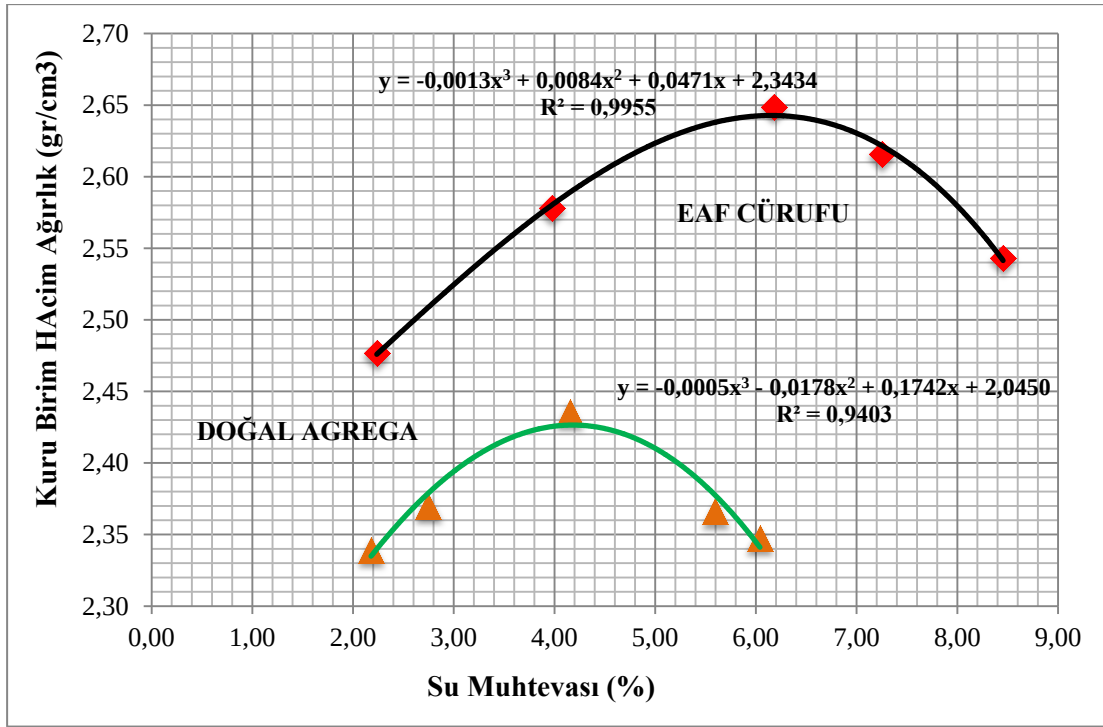
Çizelge 5.21 : Üst limit granülometrisinde W – KBHA

EAF Cürufu			Doğal Agregaya	
	W (%)	KBHA (gr/cm ³)	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
No. 1	2,24	2,48	2,18	2,34
No. 2	3,97	2,58	2,75	2,37
No. 3	6,18	2,65	4,15	2,44
No. 4	7,25	2,62	5,60	2,37
No. 5	8,45	2,54	6,04	2,35

Şekil 5.20’de üst limit granülometrisi için EAF cürufu ve doğal agregaya Modifiye Proktor eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur.

Modifiye Proktor eğrilerine göre üst limit granülometrisi için EAF cürufu optimum su muhtevası %6,24, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 2,64 gr/cm³ bulunmuştur. Doğal agregaya optimum su muhtevası %4,16, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 2,43 gr/cm³ bulunmuştur.

Çizelge 5.22’de verilen tasarım granülometri değerlerindeki EAF cürufu ve doğal agregaya ait su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.20 : Üst limit granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri

Çizelge 5.22 : Tasarım granülometri değerleri

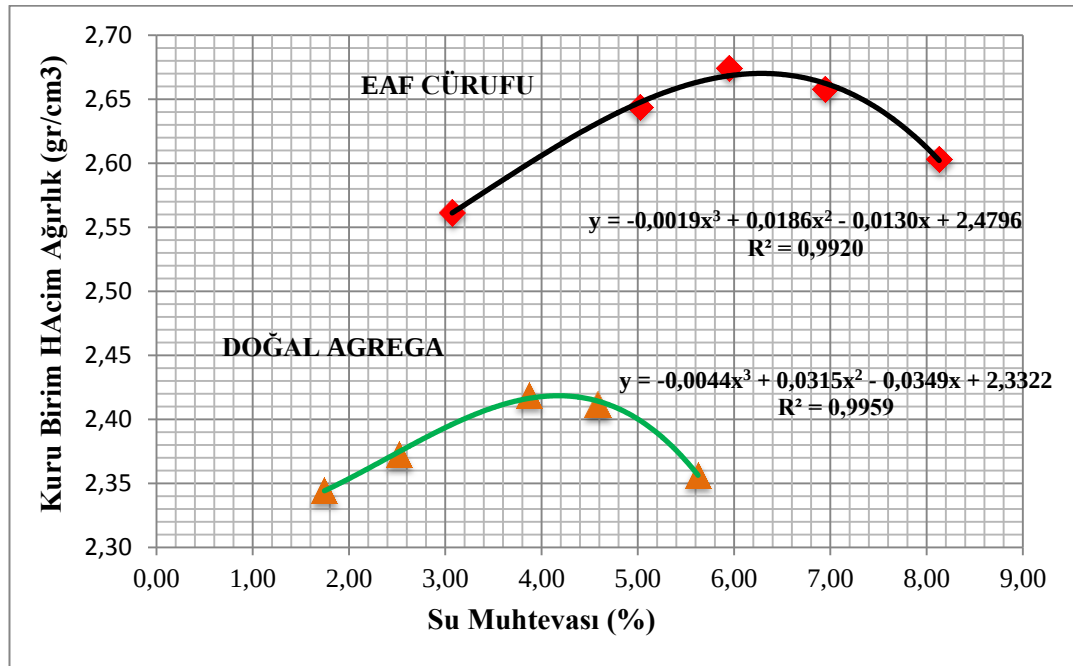
mm	Elek Açıklığı in, No	% Geçen Tasarım
37,5	1 1/2"	100
25	1"	86
19	3/4"	76
9,5	3/8"	57,5
4,75	No.4	45
2	No.10	32,5
0,425	No.40	16,5
0,075	No.200	5

Çizelge 5.23 : Tasarım granülometrisinde W – KBHA

EAF Cürufu			Doğal Agregat	
	W (%)	KBHA (gr/cm³)	W (%)	KBHA (gr/cm³)
No. 1	3,07	2,56	1,74	2,34
No. 2	5,02	2,64	2,52	2,37
No. 3	5,95	2,67	3,87	2,42
No. 4	6,95	2,66	4,58	2,41
No. 5	8,13	2,60	5,63	2,36

Şekil 5.21’de tasarım granülometrisi için EAF cürufu ve doğal agrega Modifiye Proktor eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur.

Modifiye Proktor eğrilerine göre tasarım granülometri değerleri için EAF cürufu optimum su muhtevası %6,16, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,67 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur. Doğal agrega optimum su muhtevası %4,13, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,42 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.



Şekil 5.21 : Tasarım granülometrisi Modifiye Proktor eğrileri

Tüm granülometri değerleri için EAF cürufu ve doğal agreganın Modifiye Proktor deneyi ile elde edilen optimum su muhtevası ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık sonuçları Çizelge 5.24’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, EAF cürufunun doğal agregaya göre optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.24 : Tüm granülometri değerleri için W -MKBHA sonuçları

		W (%)	MKBHA (gr/cm3)
Alt limit	EAF Cürufu	5,27	2,70
	Doğal Agrega	3,83	2,39
Üst limit	EAF Cürufu	6,24	2,64
	Doğal Agrega	4,16	2,43
Tasarım	EAF Cürufu	6,16	2,67
	Doğal Agrega	4,13	2,42

5.3.2.2. CBR deneyi (Kaliforniya taşıma oranı) sonuçları

CBR deneyinde, EAF cürufu ve doğal agreganın alt limit, üst limit ve tasarım granülometreleri için boy kısaltmaları okunmuş ve bu değerlere karşılık gelen kuvvet değerleri (kgf) belirlenmiştir. KTŞ 2013’de ÇBGT tabakası için herhangi bir CBR limit değeri verilmemiştir.

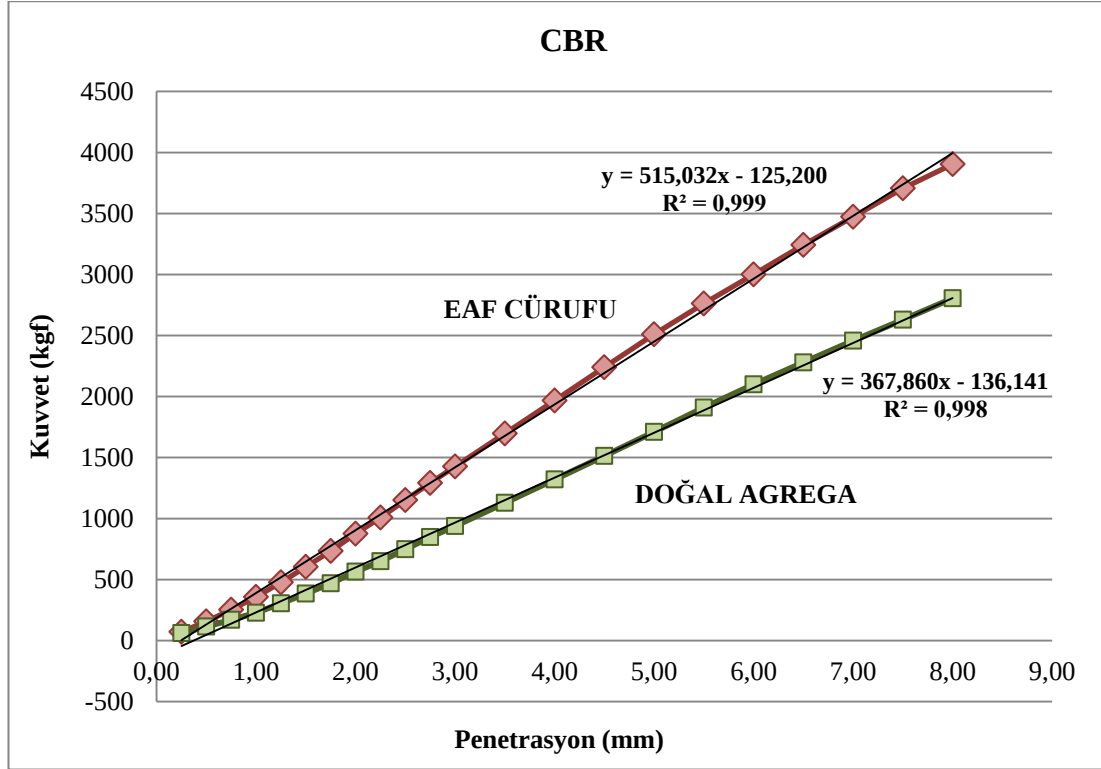
Çizelge 5.25’de EAF cürufu ve doğal agreganın alt limit granülometrisine ait CBR sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 5.25 : Alt limit granülometrisi CBR verileri

Penetrasyon (mm)	EAF Cürufu		Doğal Agregası	
	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	71,57	128,76	60,97	91,97
0,50	156,39	257,52	113,98	183,93
0,75	251,82	386,27	169,64	275,90
1,00	357,84	515,03	227,96	367,86
1,25	477,13	643,79	304,83	459,83
1,50	604,36	772,55	384,35	551,79
1,75	734,24	901,31	469,17	643,76
2,00	874,73	1030,06	564,60	735,72
2,25	1007,27	1158,82	649,42	827,69
2,50	1150,40	1287,58	747,50	919,65
2,75	1290,89	1416,34	848,22	1011,62
3,00	1426,08	1545,10	938,35	1103,58
3,50	1696,45	1802,61	1129,20	1287,51
4,00	1966,82	2060,13	1320,05	1471,44
4,50	2239,84	2317,64	1513,55	1655,37
5,00	2510,21	2575,16	1709,70	1839,30
5,50	2762,03	2832,68	1908,50	2023,23
6,00	3000,59	3090,19	2099,35	2207,16
6,50	3241,81	3347,71	2279,60	2391,09
7,00	3472,42	3605,22	2457,20	2575,02
7,50	3705,68	3862,74	2629,49	2758,95
8,00	3904,48	4120,26	2804,44	2942,88
2,5 mm'lik penetrasyon değerinde CBR %		95%	68%	
5 mm'lik penetrasyon değerinde CBR %		126%	90%	

EAF cürufu için alt limit granülometrisinde % 126 CBR, doğal agregaya için % 90 CBR değeri hesaplanmıştır. EAF cürufunun CBR değeri doğal agregaya göre yüksek çıkmıştır.

Şekil 5.22’de her iki malzemenin alt limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.22 : Alt limit granülometrisi penetrasyon grafiği

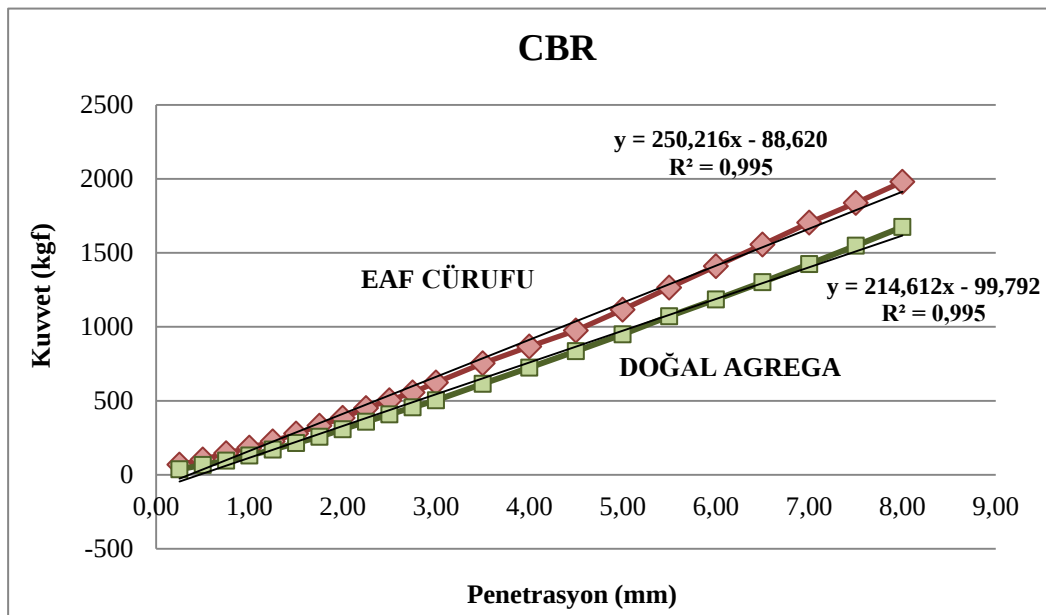
Çizelge 5.26’de EAF cürufu ve doğal agreganın üst limit granülometrisine ait CBR sonuçları gösterilmiştir.

EAF cürufu için % 61 CBR, doğal agregaya için % 53 CBR değeri hesaplanmıştır. EAF cürufunun CBR değeri doğal agregaya göre yüksek çıkmıştır.

Şekil 5.23’de her iki malzemenin üst limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrileri verilmiştir.

Çizelge 5.26 : Üst limit granülometrisi CBR verileri

Penetrasyon (mm)	EAF Cürufu		Doğal Agreg	
	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	68,92	62,55	37,11	53,65
0,50	103,38	125,11	66,27	107,31
0,75	145,79	187,66	95,43	160,96
1,00	182,90	250,22	129,88	214,61
1,25	225,31	312,77	169,64	268,27
1,50	278,32	375,32	214,71	321,92
1,75	331,34	437,88	257,12	375,57
2,00	384,35	500,43	307,48	429,22
2,25	450,62	562,99	357,84	482,88
2,50	503,63	625,54	408,21	536,53
2,75	556,65	688,09	455,92	590,18
3,00	622,91	750,65	503,63	643,84
3,50	752,80	875,76	614,96	751,14
4,00	866,78	1000,86	723,64	858,45
4,50	975,46	1125,97	834,97	965,75
5,00	1115,94	1251,08	948,95	1073,06
5,50	1264,38	1376,19	1070,88	1180,37
6,00	1410,17	1501,30	1184,86	1287,67
6,50	1555,96	1626,40	1301,49	1394,98
7,00	1704,40	1751,51	1423,43	1502,28
7,50	1836,94	1876,62	1548,01	1609,59
8,00	1980,07	2001,73	1675,24	1716,90
2,5 mm'lik penetrasyonda CBR %		46%		39%
5 mm'lik penetrasyonda CBR %		61%		53%



Şekil 5.23 : Üst limit granülometrisi penetrasyon grafiği

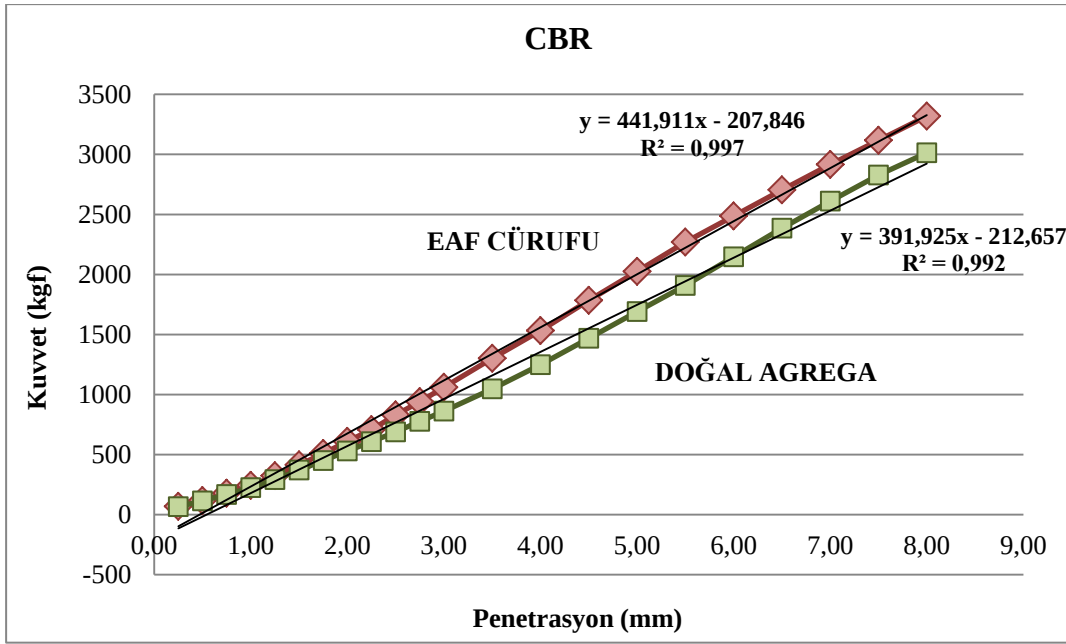
Çizelge 5.27’de EAF cürufu ve doğal agreganın tasarım granülometrisine ait CBR sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 5.27 : Tasarım granülometrisi CBR verileri

Penetrasyon (mm)	EAF Cürufu		Doğal Agregası	
	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	68,92	110,48	66,27	97,98
0,50	116,63	220,96	113,98	195,96
0,75	177,60	331,43	166,99	293,94
1,00	243,86	441,91	225,31	391,93
1,25	323,39	552,39	291,58	489,91
1,50	413,51	662,87	371,10	587,89
1,75	508,93	773,34	450,62	685,87
2,00	609,66	883,82	530,14	783,85
2,25	707,74	994,30	607,01	881,83
2,50	829,67	1104,78	689,18	979,81
2,75	941,00	1215,26	776,66	1077,79
3,00	1060,28	1325,73	861,48	1175,78
3,50	1301,49	1546,69	1047,03	1371,74
4,00	1532,10	1767,64	1248,48	1567,70
4,50	1783,92	1988,60	1468,49	1763,66
5,00	2025,13	2209,56	1691,15	1959,63
5,50	2269,00	2430,51	1908,50	2155,59
6,00	2486,36	2651,47	2147,07	2351,55
6,50	2703,71	2872,42	2385,63	2547,51
7,00	2915,77	3093,38	2610,94	2743,48
7,50	3117,22	3314,33	2828,30	2939,44
8,00	3318,68	3535,29	3013,85	3135,40
2,5 mm'lik penetrasyon değerinde CBR %		81%	72%	
5 mm'lik penetrasyon değerinde CBR %		108%	96%	

EAF cürufu için % 108 CBR, doğal agregası için % 96 CBR değeri hesaplanmıştır. EAF cürufunun CBR değeri doğal agregaya göre yüksek çıkmıştır.

Şekil 5.24’da her iki malzemenin tasarım granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.24 : Tasarım granülometrisi penetrasyon grafiği

Çizelge 5.28’de EAF cürufu ve doğal agreganın tüm granülometri değerlerine ilişkin CBR sonuçları verilmiştir. Tüm granülometri değerleri için EAF cürufunun CBR sonuçları doğal agregadan yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.28 : Tüm granülometri değerleri için CBR (%) sonuçları

	CBR (%)	
	EAF Cürufu	Doğal Agregası
Alt Limit	126	90
Üst Limit	61	53
Tasarım	108	96

5.3.2.3. Serbest basınç dayanımı (tek eksenli basınç) deneyi sonuçları

EAF cürufu ve doğal agregası ile KTŞ 2013’e göre hazırlanan çimentolu karışımlara ilave edilen su miktarı, bu karışımların granülometrilere göre farklılık göstermektedir. Karışımların su içeriği, daha önce Modifiye Proktor deneyi ile bulunan optimum su içeriklerinin 0,5 fazlası kadardır [39].

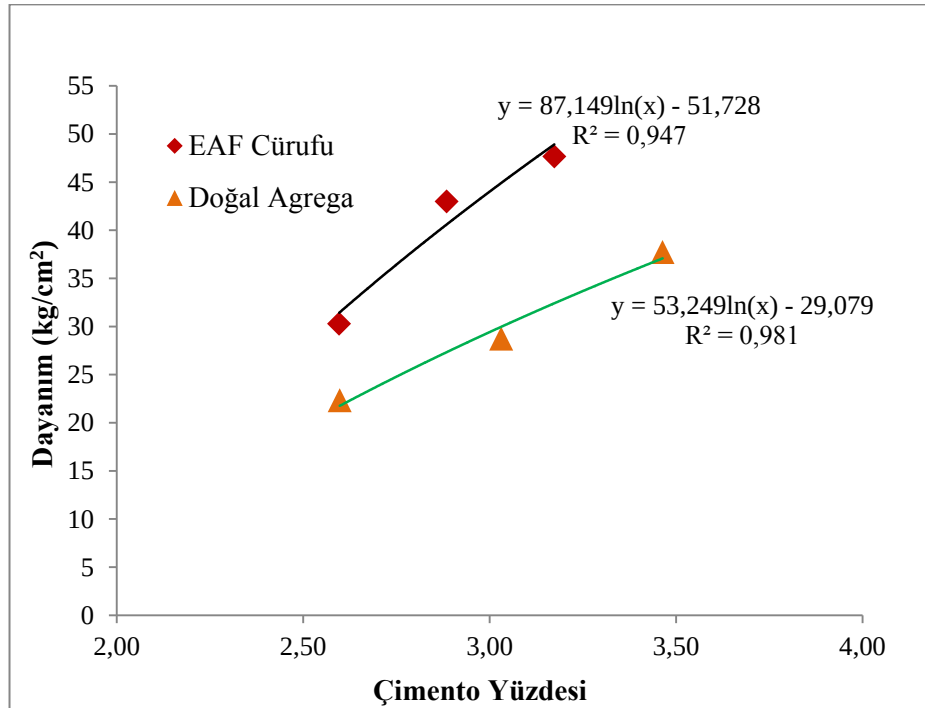
EAF cürufu ve doğal agreganın alt limit, üst limit ve tasarım granülometri değerlerine 3 farklı oranda çimento eklenerek toplam 18 numune elde edilmiştir. Tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımları belirlenmiş ve bu dayanımlara göre KTŞ 2013’de belirtilen 35 ile 55 kg/cm² dayanım değeri aralıklarını sağlayan çimento oranları hesaplanmıştır. ÇBGT tabakası dayanımının şartnamede alt ve üst

limitler ile sınırlandırılmaktadır. Böylece ÇBGT tabakasının alt limit ile minimum mukavemetin sağlanması, üst limit ile aşırı rijit davranış göstermesinin önlenmesi amaçlanmaktadır [5]. Çizelge 5.29’de farklı çimento oranlarına göre elde edilen serbest basınç dayanım değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.29 : Serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Numune		EAF Cürufu		Doğal Agregaya	
		Çimento Miktarı (%)	Dayanım (kg/cm ²)	Çimento Miktarı (%)	Dayanım (kg/cm ²)
Alt limit	No. 1	3,17	47,664	3,46	37,739
	No. 2	2,89	42,990	3,03	28,737
	No. 3	2,60	30,295	2,60	22,331
Üst limit	No. 1	3,71	16,907	3,73	15,465
	No. 2	3,37	15,522	3,26	14,599
	No. 3	3,03	13,445	2,80	13,387
Tasarım	No. 1	3,33	56,204	3,70	41,316
	No. 2	3,00	52,395	3,24	35,430
	No. 3	2,66	37,623	2,78	21,812

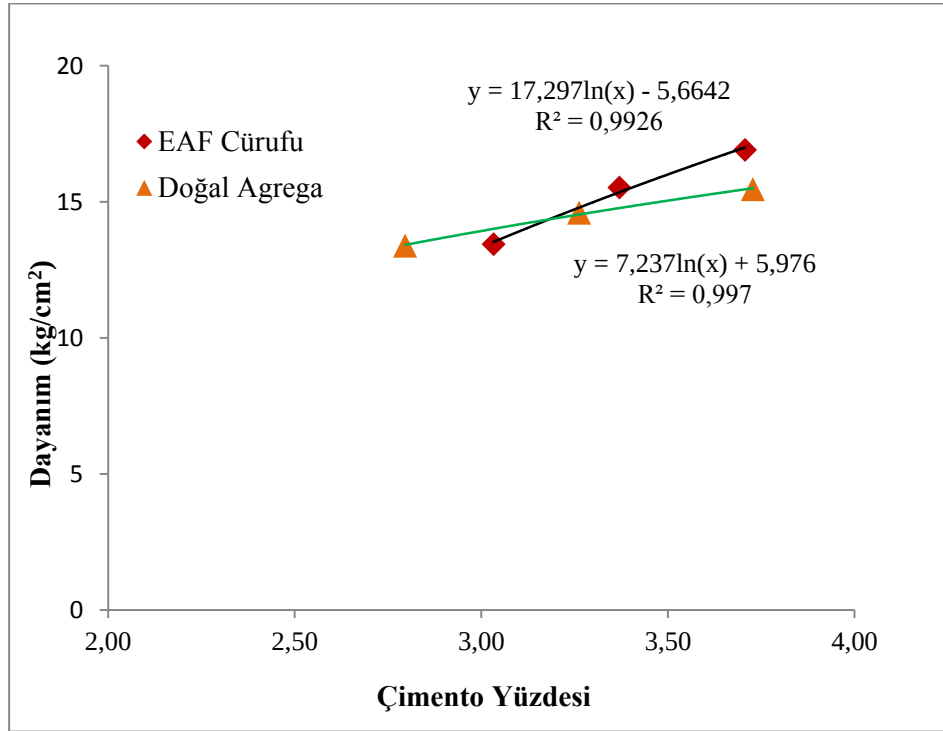
Alt limit granülometrisine sahip numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanımları Şekil 5.25’de gösterilmiştir. EAF cürufu doğal agregaya göre daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.



Şekil 5.25 : Alt limit granülometrisi serbest basınç dayanımları

Alt limit granülometrisi için EAF cürufu %2,71 - %3,40 arası, doğal agrega %3,33 - %4,85 arası çimento oranları ile KTŞ 2013’de belirtilen dayanımları sağlamaktadır.

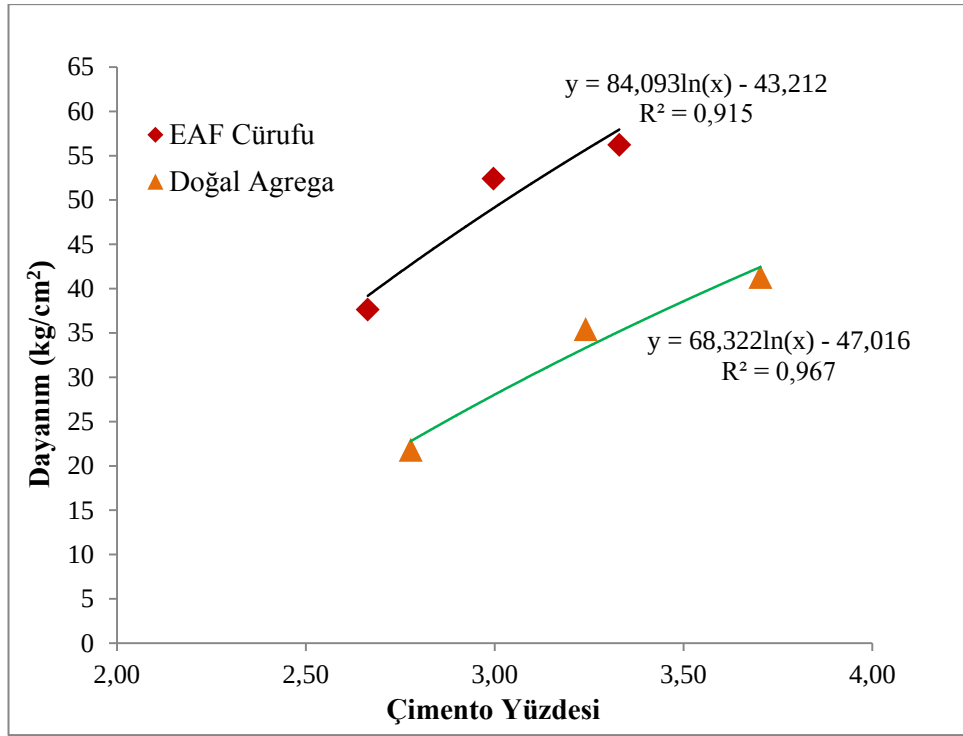
Üst limit granülometrisine sahip numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanımları Şekil 5.26’da gösterilmiştir. İnce malzemenin fazla olduğu bu numuneler, hem EAF cürufunda hem de doğal agregada düşük basınç dayanım değerleri ile yetersiz sonuçlar vermiştir.



Şekil 5.26 : Üst limit granülometrisi serbest basınç dayanımları

Alt limit ve üst limit granülometri değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanan tasarım granülometrisi ile hazırlanan numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanımları Şekil 5.27’de gösterilmiştir. EAF cürufu doğal agregaya göre yüksek dayanım sonuçları vermiştir.

Tasarım granülometrisi için EAF cürufu %2,54 - %3,22 arası, doğal agrega %3,32 - %4,45 arası çimento oranları ile KTŞ 2013’de belirtilen dayanımları sağlamaktadır. Tasarım granülometrisinde, EAF cürufu alt limit granülometrisinden daha yüksek dayanım sonuçları, doğal agrega ise alt limit granülometrisine yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 5.27 : Tasarım granülometrisi serbest basınç dayanımları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Kocaeli’de bulunan Çolakoğlu Metalurji A.Ş. tesislerinden alınan Elektrik Ark Fırını (EAF) cüruflarının, karayolu esnek üstyapı inşaatında Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) tabakasında yapay agrega olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada, deneyler, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013’de belirtilen standartlara göre yapılmıştır. Malzemenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerekli deneyler ile ÇBGT tabakasına ait deneyler, EAF cürufu ile karıştırılmak suretiyle doğal agregaya da uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

- EAF cürufunun kaba ve ince agregalara ait özgül ağırlıkları (zahiri, kuru, DKY) doğal agregadan yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi, EAF cürufunda yüksek oranda demir bulunmasıdır.
- EAF cürufunun su emme oranları kaba agregada %2,16, ince agregada %2,48 bulunmuştur. Doğal agrega için bu değerler kaba agregada %0,46, ince agregada %0,60’dır. EAF cürufunun pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip olması yüksek su emme oranı değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur. Her iki malzeme de KTŞ 2013 limit değeri olan %3’ün altındadır. Su emme oranları ile doğrudan ilgili olan hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi sonuçları EAF cürufunda %9,51, doğal agregada %2,05 bulunmuştur. Su emme oranı yüksek çıkan EAF cürufunun hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi ile kayıp oranı da doğal agregadan yüksek çıkmıştır. Buna rağmen %20 olan KTŞ 2013 limit değeri sağlanmıştır.
- İnce malzeme miktarını arttırarak agrega granülometrisinin bozulmasına sebep olan aşınma kayıpları Los Angeles aşınma deneyi ile belirlenmiştir. Deney sonucuna göre, EAF cürufunun aşınma değeri %23, doğal agreganın aşınma değeri %17 bulunmuştur. Her iki malzeme de KTŞ limit değeri olan %30’u sağlamıştır. EAF cürufunun daha köşeli yapıya sahip olması aşınma değerinin artmasına yol açmıştır.

- Su etkisi ile agregalarda aşınmaya neden olan kil topağı ve dağılabilen tane oranı EAF cürufu için kaba agregada %0,32, ince agregada %0,40 olarak elde edilirken, doğal agrega için kaba agregada %0,61, ince agregada %3 olduğu belirlenmiştir. %1 olan KTŞ limiti doğal agregada kaba tanelerde ve EAF cürufunda sağlanırken, doğal agreganın ince taneleri için sağlanamamıştır.
- Yassılık indeksi deneyi sonucuna göre EAF cürufunun yassılık indeksi %4.63, doğal agreganın %9,30 olarak belirlenmiştir. Yassı taneler yol yapısında hasara sebep olduğunda KTŞ’de maksimum yassılık indeksi %30 olarak verilmiştir. Her iki malzeme de şartname değerini sağlamıştır.
- KTŞ’de ÇBGT tabakasında kullanılacak ince ve kaba agregalarda organik madde bulunmaması istenmektedir. Organik madde içeriği deneyinde EAF cürufu ve doğal agregada organik maddeye rastlanmamıştır. Her iki malzeme de şartname gereğini sağlamıştır.
- İnce agrega içerisindeki kil miktarını belirleyen metilen mavisi deneyi ile EAF cürufunda 0,33 g/kg, doğal agregada 0,52 g/kg metilen mavisi değeri hesaplanmıştır. Bu değerler KTŞ’de verilen 1 g/kg limit değerinin altındadır. Bununla birlikte, plastik limit deneyi ile EAF cürufu ve doğal agreganın plastik özellik göstermediği de belirlenmiştir.
- ÇBGT tabakası için EAF cürufu ve doğal agrega ile yapılan farklı granülometrilere sahip numunelere ait Modifiye Proktor deneyi sonuçlarına göre EAF cürufunun doğal agregadan tüm granülometrilere daha yüksek optimum su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığı değerleri verdiği görülmüştür. Bu durum EAF cürufunun daha yüksek su emme oranına ve daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, her iki malzemede de ince agrega miktarı arttıkça optimum su muhtevasının da arttığı görülmüştür.
- EAF cürufunun ve doğal agreganın yük taşıma kapasitesi CBR deneyi ile belirlenmiştir. EAF cürufu tüm granülometrilere doğal agregadan daha yüksek CBR sonuçları vermiştir.

EAF cürufunda kaba agrega miktarı arttıkça CBR değeri de artmıştır. EAF cürufunun yüzey pürüzlülüğünün, agregalar arasındaki temasın ve sürtünme kuvvetinin daha fazla olması sebebiyle kilitlenme özelliği de daha fazladır. Bu durum agregaların içsel sürtünmesini arttırmaktadır. Kaba agrega oranının daha yüksek olması kenetlemeye sebep olmakta ve CBR değerini arttırmaktadır. Doğal agrega EAF

cürufuna göre daha az pürüzlü yüzeylere sahiptir. Dolayısıyla, doğal agregada en yüksek CBR değeri tasarım granülometrisinde elde edilmiştir. Boşluklar ince agregaya ile doldurularak daha yüksek CBR ile daha yüksek stabilite elde edilmesi sağlanmıştır. Üst limit granülometrisinde ise her iki malzeme de düşük CBR değerleri vermiştir.

- Çimento ile hazırlanan EAF cürufu ve doğal agregaya numunelerine yapılan serbest basınç dayanım deneyinde, üst limit granülometrisinde yetersiz sonuçlar alınmıştır.

Stabilitesi doğal agregaya göre daha fazla olan EAF cürufu için ÇBGT tabakasında limit dayanımları sağlayacak çimento oranları, alt limit granülometrisi için %2,71 - %3,40, tasarım granülometrisinde %2,54 - %3,22 olarak belirlenmiştir. Doğal agregada ise alt limit granülometrisinde limit dayanımlar %3,33 - %4,85 çimento oranları ile sağlanırken, tasarım granülometrisinde %3,32 - %4,45 çimento oranları ile sağlanmıştır. EAF cürufunda gerekli çimento oranları doğal agregaya kıyasla daha az çıkmıştır. EAF cürufunun pürüzlü yüzeye sahip olması agregaya ile çimento hamuru arasındaki aderansı arttırmıştır.

Her iki malzeme için de tasarım granülometrelerinde gerekli çimento miktarı alt limit granülometrisine göre daha azdır. Alt limit granülometrisinde fazla bulunan kaba agregaların yüzeyini kaplamak için daha fazla çimentoya ihtiyaç duyulmuştur.

- Deney sonuçlarına göre EAF cürufunun, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de belirtilen kriterleri sağlayarak karayolu esnek üstyapılarında çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasında yapay agregaya olarak kullanımı uygun bulunmuştur.
- İçsel sürtünmesi fazla olan EAF cürufunun, vermiş olduğu yüksek CBR değerleri sebebiyle granüler temel ve Plent-Miks temel gibi bağlayıcısız temel tabakalarında yapay agregaya olarak kullanılabilirliği araştırılmalıdır. Ayrıca, şartnamelerde yapılacak değişiklikler ile karışım granülometreleri düzenlenebilir. Daha az ince agregaya kullanılarak yüksek stabilite değerleri sağlanabilir.
- EAF cürufunun fiziksel deneylere göre yol inşaatında kullanılabilecek dayanıklılığa, yük taşıma kapasiteleri için yapılan deneylere göre de yüksek stabiliteye sahip olduğu görülmüştür. Uygun granülometri ile EAF cürufunun yol inşaatında yapay agregaya olarak kullanılması, doğal agregaya göre daha uzun ömürlü ve yüksek stabiliteli yol üstyapısı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yol inşaatında EAF cürufu kullanımı atık oluşumunu azaltarak çevreye yarar

sağlamasının yanısıra bertaraf maliyetlerinin de azalmasına sebep olacak ve doğal agregaya göre daha ekonomik bir seçenek olacaktır.

Fakat EAF cürufunun özgül ağırlığının fazla olması taşıma maliyetini yükseltmektedir. EAF cürufunun Türkiye'deki çelik üretim tesislerinin bulunduğu bölgelerde yapılacak yol inşaatlarında kullanılması ile minimum taşıma sağlanması hedeflenebilir. Böylece EAF cürufunun doğal agregaya göre ekonomik bir alternatif olma durumunu sürdüreceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, A., Sütaş, İ.** (2008). *Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı*. İMO Teknik Dergi, 4455-4470, Yazı 294.
- [2] **Alataş, T., Somunkıran, E. T., Ahmedzade, P.** (2006). *Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agregası Olarak Kullanılması*. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 225-234, Yazı 11.
- [3] **Akbulut, H., Gürer, C.** (2006). *Atık mermerlerin Asfalt Kaplımalarda Agregası Olarak Değerlendirilmesi*, İMO Teknik Dergisi, 3943-3960, Yazı 261.
- [4] **Öcal, Y.** (2014). *Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi*, (Uzmanlık Tezi). T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2911, Ankara.
- [5] **Tunç, A.** (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- [6] **Umar, F. ve Ağar, E.** (1985). *Yol Üstyapısı*. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [7] **URL-1** <<http://www.asmud.org.tr/>>, alındığı tarih: 15.04.2015.
- [8] **Ahmedzade, P., Yılmaz, M.** (2007) *Uzun Ömürlü Esnek Üstyapıların Tasarımı*. 7. Ulaştırma Kongresi, İstanbul.
- [9] **Tunç, A.** (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [10] **Tunç, A.** (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [11] **Özdabak, A.** (2004). *Demir-Çelik ve Enerji*. Rengin Basımevi, İstanbul
- [12] **The World Steel Association.** (2014). *Steel Statistical Yearbook 2014*. Brüksel
- [13] **URL-2** <<http://www.worldsteel.org/>>, alındığı tarih: 11.03.2015.
- [14] **TÇÜD.** (2015). *Türkiye Çelik Haritası*, Çelik Dergisi, Sayı 50, 46.
- [15] **T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı.** (2014). *Demir Çelik Sektör Raporu*. Hatay
- [16] **URL-3** <<http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/coal-steel/>> alındığı tarih: 16.03.2015.
- [17] **TÇÜD.** (2015). *Türkiye Çelik Üretimi*, Çelik Dergisi, Sayı 49, 35.
- [18] **Geerdes, M., Toxopeus, H., Vliet, C.** (2009). *Modern Blast Furnace Ironmaking*. Amsterdam
- [19] **Avrupa Birliği.** (2007). *Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (IPPC) Demir ve Çelik Üretiminde En İyi Teknolojiler Referans Dokümanı*. Demir Çelik Üreticileri Derneği, Ankara.

- [20] **Campbell, F., C.** (2013). *Metals Fabrication: Understanding the Basics*. USA.
- [21] **T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.** (2012). *Elektrik Ark Ocaklı Demir Çelik Tesisleri için MET kılavuzu*, Ankara.
- [22] **The World Steel Association.** (2014). *Fact Sheet, Steel Industry by-products*. Brüksel
- [23] **Eren, E., Derun, E. M., Pişkin, S.** (2010) *Çelikhane Cüruflarının Beton Üretiminde Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- [24] **Yıldırım. I. Z., Prezzi. M.** (2011). *Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag*, Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering, New York
- [25] **Erdoğan, T. Y.** (2000). *Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanılması*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
- [26] **URL-4** <<http://www.euroslag.org/products/statistics/2012/>> alındığı tarih: 04.04.2015.
- [27] **Shen, H., Forssberg, E.** (2002). An overview of recovery of metals from slag. *Waste Management* 23, 933-949.
- [28] **Altan, E.** (2001). *Çelikhane Cürufu İçerisindeki Hurdaların Değerlendirilmesi*. 1. Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak.
- [29] **Chen, B., Yang, J., Ouyang, Z.** (2011). *Life Cycle Assessment of Internal Recycling Options of Steel Slag in Chinese Iron and Steel Industry*. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18, 33-40.
- [30] **Özkan, Ö.** (2008). *Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufu Katkılı Çimentolarla Üretilen Harçların Sülfat Dayanımı*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 23, 1-8.
- [31] **Beycioğlu, A., Başyigit, C., Subaşı, S.,** (2008). *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması*. Çevre Sorunları Sempozyumu, Kocaeli.
- [32] **Australasian Slag Association,** (2002). *A guide to the use of iron and steel slag in roads*, Wollongong
- [33] **Kaya, G., Turan, S.** (2004). *Yüksek Fırın Cürufunun Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Eldesinde Değerlendirilmesi*. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 536, 48-60, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları.
- [34] **Kuruoğlu, M., Özden, G., Kayalar, A. Ş.** (2006). *Çelik Cüruflarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Trabzon.
- [35] **Candan, E.** (2000). *Metalurjik Cürufların Yüzey Temizleme İşlemlerinde Grit Olarak Kullanımı*. *Metalurji Dergisi*, 126, 22-25.
- [36] **Shi, C., Qian, J.** (2000). *High performance cementing materials from industrial slags- a review*. *Conservation and Recycling* 29,195-207.

- [37] **Geisler, J.** (1996). *Use Of Steel Works Slag in Europe*. Waste Management 16, 59-63.
- [38] **Demir, A., Yıldırım, D., Köleli, N.** (2014). *Çelikhane Cürufundan ve Tufalından Bitki Besin Elementlerinin Geri Kazanımı ve Bu Elementlerin Bitki Büyümesine Etkisi*, 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- [39] **Karayolu Teknik Şartnamesi** (2013). KGM Yayını, Ankara.
- [40] **TS EN 1097-6** (2013). Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [41] **ASTM C131** (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, *American Society for Testing and Materials*, USA.
- [42] **BS 812-105.2** (1990). Elongation Index of Coarse Aggregate, *British Standard*, England.
- [43] **TS EN 1744-1:2009+A1** (2013). Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Kimyasal Analiz, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [44] **TS EN 933-9: 2013 +A1** (2014). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 9: İnce Malzeme Tayini – Metilen Mavisini Deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [45] **Yitik, H.** (2006). *İnce Tanelerdeki Kil İçeriğinin Metilen Mavisini Deneyi ile Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [46] **ASTM C142** (2010). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, *American Society for Testing and Materials*, USA.
- [47] **TS EN 1367-2** (2011). Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [48] **Orhan, M., Özer, M., Işık, N. S.** (2013). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri Cilt 1*, Gazi Kitabevi, Ankara.
- [49] **TS 1900-1:2006-T2** (2015). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [50] **ASTM D1883** (2014). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory - Compacted Soils, *American Society for Testing and Materials*, USA.
- [51] **TS EN 197-1** (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [52] **Yeğinobalı, A.** (2003). *Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar*. Türkiye Mühendislik Haberleri, 426, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Irmak Sema Seren

Doğum Yeri ve Tarihi : 10.07.1989 / Trabzon

E-Posta : serenirmak@gmail.com

Lisans : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği