



ÇELİK CÜRUFUNUN ŞİŞME POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tuğba CENGİZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2019

Tuğba CENGİZ tarafından hazırlanan “ÇELİK CÜRUFUNUN ŞİŞME POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Seyhan FIRAT

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa ÖZER

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 13/12/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuğba CENGİZ
13/12/2019

ÇELİK CÜRUFUNUN ŞİŞME POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğba CENGİZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

ÖZET

Dünya nüfusunun artmasıyla tüketim ihtiyacı artmıştır. Artan tüketim nedeniyle, üretim sonucu ortaya çıkan atık malzemeler de artar. Endüstriyel ürünlerin üretimi sonucu çeşitli katı atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Katı atıkların sahalara taşınması ve depolanması gerekmektedir. Katı atıklar yaşam alanlarının sınırlandırılmasına ve bazı çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Bir katı atık türü olan çelik cürufu, dünyada ve ülkemizdeki demir-çelik üretimi sonucu çok miktarda ortaya çıkmaktadır. Çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelik cürufu doğal agregaya benzer yapısından dolayı yol yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yapısındaki serbest CaO ve MgO içeriğinden dolayı su ile karşılaştığında hidrate olarak yüksek şişme potansiyeli göstermektedir. Bu nedenle, inşaat sektöründe kullanılmadan önce çelik cürufunun yüksek şişme potansiyelinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada Ereğli Demir Çelik Fabrikasından temin edilen Bazik Oksijen Fırını (BOF) çelik cürufu numunelerinin şişme potansiyeli deneyleri TS1900-1/2006'ya göre Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda yüksek enerjide optimum su muhtevasında sıkıştırılmış çelik cüruf numuneleri olan BOF-1 BOF-2 ve BOF-3'ün 173 günlük şişme değerlerinin sırasıyla %1,07, %1,40, %1,78 olduğu belirlenmiştir. Standart enerjide ve doğal su muhtevalarında sıkıştırılmış taze çelik cürufu numuneleri olan BOF-4 BOF-5 BOF-6'nın 36 günlük şişme değerleri %3,09, %3,43, %2,94 olarak gözlemlenmiştir ve şişmenin devam ettiği görülmüştür. 7 ay laboratuvar ortamında kendi nemi korunarak bekletilmiş BOF-7 numunesinin %0,28 şişme göstererek durduğu gözlemlenmiştir. Taze çelik cürufu numunelerinin yüksek şişme potansiyeli gösterdiği ve şartname sınır değerlerini aştığı görülmüştür. Ancak 7 ay bekletilmiş BOF-7 numunesinin şişmesinin kısa sürede bittiği ve Karayolları Teknik Şartnamesindeki sınır şişme değerini sağladığı görülmüştür. Bu durumda bu numunenin yol altyapısında güvenle kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Çelik Cürufu, Şişme Potansiyeli, Geri Dönüşüm
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

THE SWELLING POTENTIAL OF STEEL SLAG

(M. Sc. Thesis)

Tuğba CENGİZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

With the increase of the world population, the need for consumption has increased. Due to the increasing of consumption, the waste materials generated by the production also increase. Various solid waste materials occur as a result of the production of industrial products. Solid wastes need to be transported to landfills and stored. They cause limitation of habitats and some environmental problems. Slag, a type of solid waste, is produced in large amounts as a result of iron and steel production in the world and in our country. Steel slag, which is produced as a result of steel production, is widely used in road construction due to its structure similar to natural aggregate. However, due to the content of free CaO and MgO in its structure, it shows high swelling potential when hydrated. Therefore, the high swelling potential of steel slag must be considered before being used in the construction sector. In this study, swelling potential tests of Basic Oxygen Furnace (BOF) steel slag samples supplied from Ereğli Iron and Steel Factory were determined according to TS1900-1 / 2006 in Gazi University Faculty of Technology Soil Mechanics Laboratory. The results showed that 173 day swelling values of BOF-1 BOF-2 and BOF-3, which are compressed steel slag samples with optimum water content at high energy, were 1.07%, 1.40%, 1.78%, respectively. The 36-day swelling values of BOF-4 BOF-5 BOF-6, which are compressed fresh steel slag samples at standard energy and natural water contents, were observed as 3.09%, 3.43%, 2.94% and the swelling was observed to continue. It was observed that BOF-7 sample, which was kept in the laboratory for 7 months while maintaining its own moisture, stopped with 0.28% swelling. Fresh steel slag samples showed high swelling potential and exceeded the limit values in specification. However, it was observed that the swelling of BOF-7 sample, which was kept for 7 months, ended in a short time and provided the limit swelling value in the Technical Specifications of Highways. In this case, it is concluded that this sample can be used safely in the road infrastructure.

Science Code : 91105

Key Words : Steel Slag, Swelling Potential, Recycling

Page Number : 61

Supervisor : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamı hazırlarken engin bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, vazgeçtiğim noktalarda anlayışı ile desteğini esirgemeyerek devam etmemi sağlayan kıymetli Danışman Hocam Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a, tez savunma jürimde bulunan ve katkı sağlayan kıymetli Hocalarım Prof. Dr. Berna UNUTMAZ'a ve Doç. Dr. Mustafa ÖZER'e, deneylerimi yapmam için gerekli materyali sağlayarak çalışmama destek olan Ereğli Demir Çelik Fabrikası'na, ilgi ve özverisinden dolayı Ereğli Demir Çelik Fabrikası Çelik Hammaddeler ve Demir Üretim Ar-Ge Müdürü Sayın Ferhat PARLAK'a, deneylerin yapımında bana yardımcı olan sevgili genç mühendis adayları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü son sınıf öğrencileri Efe ANIK ve Mustafa YALÇIN'a, teşekkürü borç bilirim. Bu yolda birlikte yürüdüğümüz, karşılaştığımız sıkıntıları beraber aştığımız yol arkadaşlarım Nesrin Gizem ÇAKIR'a ve Murat KALENDER'e, umutsuzluğa düştüğüm anlarda bana destek olan ailem ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Çelik Cürufunun Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi.....	15
2.1.1. Uzun dönem şişme testleri	19
2.1.2. Hızlandırılmış şişme testleri.....	21
2.2. Çelik Cürufunun Şişme Potansiyelinin Düşürülmesi.....	24
3. MATERYAL ve METOT	29
3.1. Çelik Cürufu ve Üretimi.....	29
3.1.1. Yüksek fırın cürufu	32
3.1.2. Bazık oksijen fırın çelik cürufu (BOF)	34
3.1.3. Elektrik arklı fırın çelik cürufu (EAF)	36
3.1.4. ERDEMİR çelik cürufu	38
3.2. Yapılan DeneySEL Çalışmalar	41
3.2.1. Elek analizi.....	41

Sayfa

3.2.2. Modifiye proktor deneyi	44
3.3.3. Uzun dönem şişme testi	47
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. EAF çelik cüruflarının kimyasal kompozisyonu	5
Çizelge 2.2. EAF çelik cürufu kimyasal içeriği	10
Çizelge 3.1. Dünya ham çelik üretim sıralaması	29
Çizelge 3.2. Yüksek fırın cürufu kimyasal içeriği	33
Çizelge 3.3. BOF çelik cürufu kimyasal kompozisyonu	36
Çizelge 3.4. Tipik EAF çelik cürufu kimyasal yapısı	37
Çizelge 3.5. BOF, EAF çelik cüruflarının teknik özellikleri	38
Çizelge 3.6. ERDEMİR çelik cürufu kimyasal analizi	40
Çizelge 3.7. Hazırlanan elek setinin göz açıklıkları	42
Çizelge 3.8. BOF numuneleri elek analizi sonuçları	43
Çizelge 3.9. Kuru birim hacim ağırlık değerleri	46
Çizelge 3.10. BOF-4, BOF-5, BOF-6, BOF-7 için şişme deneyi sonuçları	50
Çizelge 4.1. KTŞ dona hassas olmayan taban malzemelerinin özellikleri	53
Çizelge 4.2. Elek analizi sonucu 0,075 mm elekte kalan malzeme yüzdesi	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Basitleştirilmiş EAF çelik cürufu üretim şeması	5
Şekil 2.2. İyi ve kötü derecelenmiş numuneler için kompaksiyon eğrileri.....	6
Şekil 2.3. Şematik buhar testi	24
Şekil 2.4. Buharla yaşlandırma tesisi.....	27
Şekil 3.1. Türkiye demir-çelik fabrikaları haritası.....	31
Şekil 3.2. Demir-çelik üretim süreci.....	32
Şekil 3.3. Yüksek fırının şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.4. Bazik oksijen fırını ve yardımcı elemanlar.....	34
Şekil 3.5. Bazik oksijen fırını şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.6. Elektrik ark ocağı.....	37
Şekil 3.7. BOF numuneleri dane dağılım analizi.....	43
Şekil 3.8. BOF-1 Kompaksiyon eğrisi.....	46
Şekil 3.9. BOF-1, BOF-2, BOF-3 uzun dönem şişme grafiği.....	49
Şekil 3.10. BOF-4, BOF-5, BOF-6 BOF-7 uzun dönem şişme grafiği	50

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Çelik cürufu içinde cep yapmış serbest kireç	17
Resim 2.2. Uzun dönem şişme testi kurulumu	20
Resim 2.3. ASTM D4792 deney ekipmanları	21
Resim 2.4. Modifiye autoclave makinesi	22
Resim 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan BOF numuneleri	40
Resim 3.4. Kurutulmuş BOF-1 numunesine belirli oranlarda su eklenip karıştırılması.....	44
Resim 3.5. Modifiye proktor deneyi ile optimum su muhtevasının belirlenmesi.....	45
Resim 3.6. Numunelerin şişme deneyi için hazırlanması	47
Resim 3.7. Numune şişme tayini düzeneği	48
Resim 3.8. Uzun dönem şişme potansiyeli deney düzeneği	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Fe_3O_4

Magnetit

Fe_2O_3

Hematit

CaO

Kireç

CaF₂

Fluşpat

CaMg(CO₃)₂

Dolomit

CaB₃O₄(OH)₃.H₂O

Kolemanit

FeO

Tufal

Kısaltmalar

Açıklamalar

AASTO

Amerikan Karayolları Birliği

ASTM

Amerika Deney ve Malzeme Kurumu

BOF

Bazik Oksijen Fırını

CBR

Kaliforniya Taşıma Oranı Testi

EAF

Elektrik Arklı Fırın

ERDEMİR

Ereğli Demir Çelik Fabrikası

İSDEMİR

İskenderun Demir Çelik Fabrikası

KARDEMİR

Karabük Demir Çelik Fabrikası

LD

Linz-Donawitz

LMF

Pota Metalürji Fırını

LVDT

Deplasman Ölçer

ULCOS

Ultra Düşük CO₂ Çelik Üretimi

XRD

X Işını Kristalografisi

XRF

X-Işını Floresans

1. GİRİŞ

Endüstrileşen günümüz dünyasında üretim sonucu ortaya çok çeşitli katı atıklar çıkmaktadır. Katı atıkları bertaraf etmek ya da katı atık sahalarına taşıyarak yığınlar halinde depolamak gerekmektedir. Bu işlemler için gereken iş gücü işletmelere maddi açıdan büyük yük olmaktadır. Ortaya çıkan katı atık miktarlarının azaltılması için çalışılmakta ancak çoğu zaman üretim verimliliğini düşürdüğü için tercih edilmemektedir. Bu nedenle oluşan katı atıkları doğru uygulamalara yönlendirerek atık olmaktan çıkarıp ürün olarak değerlendirmek yapılabilecek en mantıklı çözümdür. Katı atıkların maksimum seviyede geri kazandırılması, katı atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru şekilde tayin edilip tanınarak uygun projelere yönlendirilmesi ile mümkündür. Demir-çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelik cürufları inşaat sektöründe ürün olarak kullanıma uygun, geri kazandırılabilir katı atık malzeme türüdür. Çelik cürufları doğal agregalar gibi granüler yapıya sahiptir. Çelik cürufunun yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle demiryolu ve karayollarında dolgu malzemesi olarak kullanılır. Zemin iyileştirme materyali olarak doğal agrega yerine kullanılmaktadır. Demiryollarında balast malzemesi, çimento üretiminde klinker, beton üretiminde agrega ve düşük mukavemetli kilit taşı üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca doğal agregaya göre yüksek özgül ağırlığı ile dalgakıran ve hidrolik yapılarda liman dolgu malzemesi olarak da kullanımı mevcuttur. Ancak en çok kullanım alanı bulduğu ve üzerinde çalışmaların yoğunlukla yapıldığı alan ise yol inşasıdır.

Ilıcalı (1988) çalışmasında Erdemir çelik cüruflarının yol üst yapısında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çelik cürufunun fiziksel özelliklerinin üstyapı tabakalarında kullanımına uygun değerlere sahip alternatif bir agrega olduğu sonucuna, yol inşasında kullanılacak agregaların özelliklerini belirleyen deneyler yaparak ulaşmıştır. Çelik cürufu ile oluşturulan bitümlü karışımın ağır trafikli yollarda aşınma tabakasında da kullanılabileceğini belirtmiştir. Fırat vd. 2018'de yaptıkları çalışmada belirli oranlarda çelikhane cürufu, uçucu kül ve dolguya uygun bir zemin malzemesi ile karışım hazırlandığında CBR değerinde %130 oranında bir artış görüldüğü ve çelikhane cürufunun güvenle yol dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmışlardır. Karadağ vd. (2020) çelik cürufunun yol temel ve alttemel yapımında kullanılması durumunu sonlu elemanlar metodu ile modelleyip çözümlemiştir. Sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde ise çelik cürufunun doğal agrega yerine yol üst yapısında güvenle kullanılabileceğini kanıtlanmış olup yalnızca alttemelde

kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansı artmakta hem de doğal kaynakların tüketimi azaltılıp katı atık madde olan çelik cürufunun geri dönüşümü sağlanacağını belirtmiştir.

Bu çalışmada ise Zonguldak Ereğli’de bulunan ERDEMİR Demir-Çelik Fabrikasından temin edilen demir- çelik üretimi sonucu ortaya çıkan katı atık türü olan BOF (Bazik Oksijen Fırın) çelik cürufunu kullanılmıştır. Doğal agregalara göre özgül ağırlığı daha yüksek olan çelik cürufunun içeriğinde organik madde bulunmamaktadır. BOF çelik cürufu oksit ve silikatlardan oluşan mineralojiye sahip ve metalik olmayan yan ürünler olarak tanımlanabilir. Morfolojik olarak bazik oksijen çelik cürufu koyu gri renk, kübik ve pürüzlü yüzeye sahiptir. Yüksek fırın cürufuna göre sert ve sıkıdırlar.

Bu çalışmada çelik cüruflarının yol altyapısında kullanılması durumunda, şişme değerlerinin Karayolları Teknik Şartnamesindeki sınır şartlarını ihlal edip etmeyeceği deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, Zonguldak Ereğli’de bulunan ERDEMİR Demir-Çelik Fabrikasından temin edilen çeşitli dane dağılımlarına sahip BOF türü çelik cürufu numuneleri kullanılmıştır.

BOF-1 BOF-2 ve BOF-3; ERDEMİR katı atık depolama sahasından temin edilen ve yüksek enerjide, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numunelerdir. 173 gün boyunca şişme değerleri gözlemlenmiştir. BOF-1, BOF-2, BOF-3 numuneleri sırasıyla %1,07, %1,40, %1,78 oranında şişme göstermiştir. BOF-4 BOF-5 BOF-6 numuneleri ise dane dağılım grafikleri birbirinden farklı taze çelik cürufu numuneleridir. Standart enerjide, doğal su muhtevalarında sıkıştırılmışlardır. 36 gün su tankında bekletilerek şişme değerleri gözlenmiştir. 36 günün sonunda %3,09, %3,43, %2,94 oranında şişme göstermişlerdir ancak henüz şişmesi bitmemiştir. Laboratuvar şartlarında su muhtevası korunacak şekilde 7 ay yaşlandırılmış BOF-7 numunesinin %0,28 şişme gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesindeki sınır değeri yaşlandırılmış numunenin sağladığı ve yol altyapısında güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Artan çevresel bilinç ile doğal kaynakların kullanımı azaltılmak istenmektedir. Doğal kaynaklar yerine alternatif olarak katı atıkların kullanılması üzerine çalışılmaya uzun süre önce başlanmış olsa da son yıllarda önem kazanması sebebiyle yapılan bilimsel araştırmalar çoğalmıştır. Bilimsel çalışmalar ışığında katı atıkların geri dönüşümü sağlanarak atık yığınlarının azalarak bitmesi hedeflenmektedir. Oluşan her yeni atığın depolama ve bertaraf maliyetinin azalmasının yanı sıra atıkların ürün kategorisinde ekstra kazanç sağlaması, işletmelerin Ar-Ge departmanlarının bu konu üzerine eğilme motivasyonunu arttırmaktadır. Ayrıca işletmeler için katı atıkların doğal kaynaklara göre daha uygun maliyetli olması da tercih sebebidir. Katı atıkların kullanımına uygun projede değerlendirilerek yerini alması için uygulama şartlarını en iyi şekilde temsil eden deneylerle sınanıp uzun zaman gözlenmesi gerekmektedir. Demir çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelik cürufu doğal agregaya benzer yapısından dolayı inşaat sektöründe alternatif agrega kategorisinde yer bulmaktadır. Bilimsel çalışmalar çelik cürufunun inşaat sektöründe kullanılması üzerinde yoğunlaşmıştır. Çelik cürufunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin deneysel yöntemlerle tayini, zemin stabilizasyonunda kullanılması, betonda agrega olarak kullanılması, yol inşasında; yol altyapısı, temel ve alttemelde kullanılması gibi birçok alanda çalışılmış olup çalışmalar devam etmektedir.

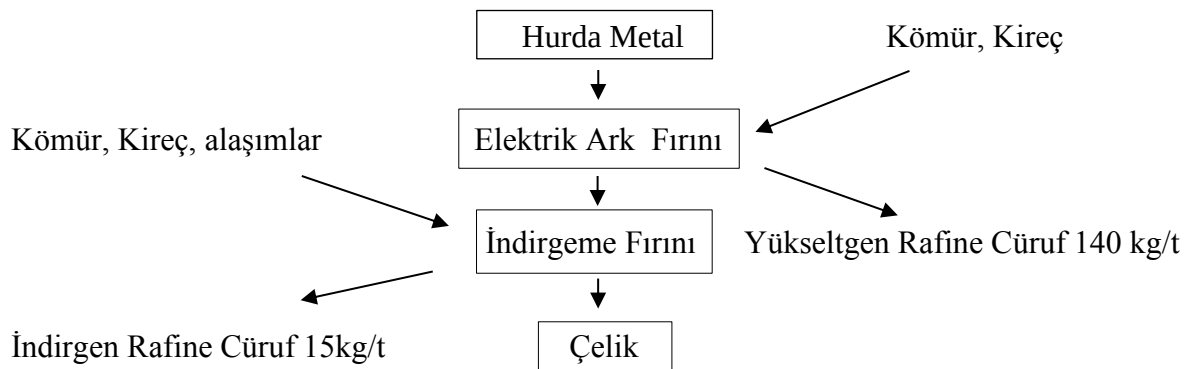
Uppot (1984) çalışmasında demir-çelik fabrikasının ek binası olan yapının taban zeminindeki deformasyonun sebebini araştırmıştır. Binanın taban zemininde 5,5 m'ye kadar BOF türü çelik cürufu dolgusu olduğu bilinmektedir. BOF türü çelik cürufunun zamanla şişmesinden dolayı deplasmana uğrayarak zarar gördüğü düşünülmüştür. Binanın inşasından 6 ay sonra zemin kat döşemesinde yükselmeler başlamıştır. 6 yıl içinde zemin kat döşemesinde 5 cm ile 25 cm arasında çatlaklar ile kolonlarda yükselme olduğu bu sebeple binanın hasar gördüğü gözlemlenmiştir. Binanın 4 m yakınında bulunan 1800°C'ye kadar ısınan çukurun çevresindeki kabarmanın 24,7 cm, şişmenin ise %4,5 ile maksimum olduğu bölgedir. Yeraltı su seviyesi dolgunun altında kaldığı ve BOF türü çelik cüruf dolgusunun muhtevasının %5 ile %10 arasında olduğu belirlenmiştir. Dolguda kullanılan aynı tür çelik cürufu numunesi fabrikadan temin edilmiş ve üzerinde serbest şişme testi ile autoclave şişme testi uygulanmıştır. %22 CaO ile %5 MgO içeriğine sahip olduğu XRD ile belirlenen çelik cürufunun serbest şişme testinde 6 günün sonunda %0,8 şişme olduğu, autoclave testinde ise

215°C’de 300 psi basınçta 3 saat geçirdikten sonra gözlenen doğrusal şişme değeri %0,05 olduğu ölçülmüştür. Çelik cürufunun yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu ve şişme potansiyelinin ısıdan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Şişme deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında serbest şişme testine göre autoclave şişme testinin bu vaka için daha uygun şartlar sağladığı gözlemlenmiştir.

Motz ve Geiseler (2001) çalışmalarında doğal kaynakların yerine endüstriyel yan ürünlerin teknik ve çevresel yeterliliğini göz önünde bulundurularak geri kazanımını araştırmak için yola çıkmışlardır. Çalışmalarında BOF türü çelik cüruflarının kimyasal kompozisyonunda %42-55 oranında CaO, %12-18 oranında SiO_2 , EAF türü çelik cüruflarının ise %25-40 oranında CaO, %12-17 oranında SiO_2 ’e sahip olduğundan bahsedilmiştir. Statik ve dinamik yüklere, çevresel etkilere karşı uzun dönem davranışında belirleyici teknik özellikler olan; birim hacim ağırlık, mukavemet, su emme kapasitesi, donma-çözünme dayanımı, hacimsel genleşme stabilitesi, aşınma dayanımı gibi özelliklerini mıcır ve granitle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmanın sonucunda çelik cürufunun doğal agregalar olan mıcır ve granite yakın karakteristik değerlere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Çelik cürufunun kimyasal kompozisyonundaki serbest CaO ve MgO şişme potansiyelinin doğal agregalara göre zayıf noktası olduğunu vurgulamışlardır. Çelik cüruflarının şişme potansiyelini belirlemek için kabul görmüş üç yöntemi karşılaştırmışlardır. Autoclave testinin gerçek şartları temsil etmediğine, su tanklarında bekleterek şişme potansiyelin belirlenmesi yönteminde çelik cüruflarının yeterli nemlilik oranına ulaşamadığından şişme potansiyelinin tam olarak belirlenemeyeceğinden ancak buhar testi ile diğer yöntemlerin eksik taraflarının giderildiğini belirtmişlerdir. Çelik cürufunun su kaynaklarında kullanımında insan ve çevre sağlığına etkilerini irdelenmişler ve zararı olmadığı sonucuna varmışlardır. Alman şartnamelerindeki sızdırma testinden ve iki yılda bir yapılması gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Bütün bu araştırmaların sonucunda yol yapımında çelik cürufu kullanılmasının; çelik cürufu kullanılmış agrega karışımlarında kompaksiyondan sonra diğer agregalara göre daha yüksek taşıma gücüne sahip olduğu, şiddetli yağmur yağışının taşıma gücüne olumsuz etkisinin olmadığı, ağır trafik yüklerine karşı kalıcı olarak deforme olmadığı, çevreyi olumsuz etkilemediği sonuçlarına varılmıştır.

Ceratti, Núñez ve Rohde (2003) çalışmalarında ekonomik büyümenin sonucu olarak artan kaplama yol ihtiyacından kaynaklanan büyük miktarda agrega ihtiyacından bahsetmektedir. Sağlam kaya kıtlığı sebebiyle oluşan yüksek maliyet alternatif çözümler aramaya itmiştir.

Belçika, İsviçre, Finlandiya, Avustralya, Amerika, Kanada, Hollanda ve Hindistan'da çelik cürufu yol temeli ve alt temelinde kullanılmaya başlamış olduğunu ve yol yapımında özellikle Japonya ve Almanya öncülük ettiğini belirtmişlerdir. Üretilen çeliğin kalitesini arttırmak için iki aşamada safsızlıklarından arındırılır. İki aşamada da çelik cürufu ortaya çıkar ve birlikte depolanırlar.



Şekil 2.1. Basitleştirilmiş EAF çelik cürufu üretim şeması

Çizelge 2.1. EAF çelik cüruflarının kimyasal kompozisyonu (Ceratti, Rohde, Nunez 2003)

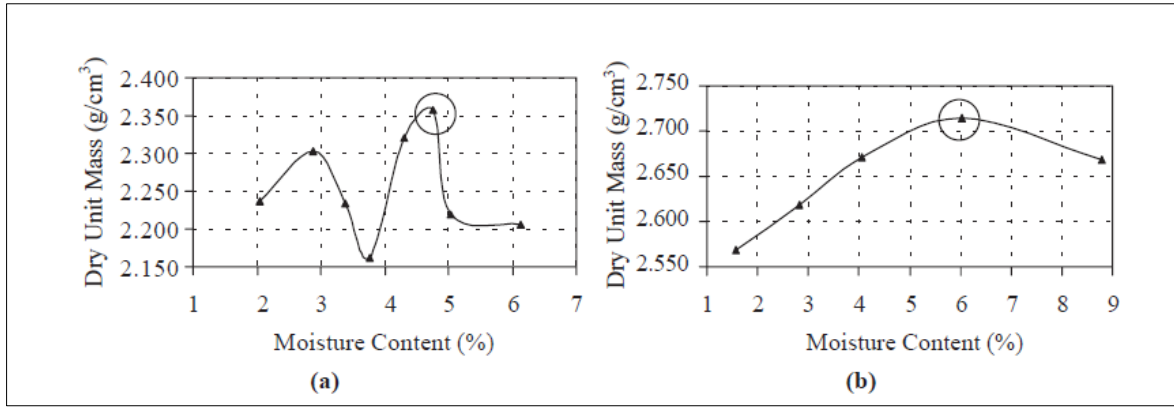
	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)
Yükseltgen Rafine	30-35	8-12	15-20	3-9	25-35	3-6	-
İndirgeyici Rafine	45-55	8-12	20-25	3-9	0,5-3,5	0,5-3,5	0,5

Yapılan deneylerde üretiminden sonra 1 ay depolama alanında beklemiş numuneler kullanılmıştır. Yükseltgen ve indirgeyici rafine çelik cürufları karışımı ve sadece indirgeyici rafine cürufları olmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Genelde üretim sürecinde ortaya çıkan cüruflar ayrıştırılmadan depolanmaktadır. Fakat indirgeyici rafine çelik cürufunun şişme potansiyeli parametresinin içeriğindeki CaO miktarıyla kötüleşeceğinden deneyler ayrıca indirgeyici rafine cürufa da uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çelik cürufu agregalarının mekanik özelliklerini belirlemek için;

- Özgül ağırlık ve emme için Brezilya Standardı DNER-ME 081/194
- Dane dağılım analizi için ASTM C88
- Los Angela Aşınma testi için ASTM C131
- Modifiye kompaksiyon testi için ASTM D1517
- CBR taşıma oranı tayini için ASTM D1883

- Elastisite modülü için DNER-ME 131/94
- Şişme potansiyelini belirlemek için ise ASTM D4792 baz alınmıştır.

Çelik cürufları doğal gradasyonunda ve sıkı gradasyonla kompaksiyona tabi tutulmuştur. İyi derecelenmemiş orijinal gradasyona sahip numunenin kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği incelendiğinde sık görülmeyen kompaksiyon eğrisi oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.2. İyi ve kötü derecelenmiş numuneler için kompaksiyon eğrileri

Bu durumun muhtemel sebeplerinin ise agrega şekilleri (köşeli ve pürüzlü) ve düzensiz kimyasal içeriğin olduğu belirtilmiştir. İyi derecelenmemiş numunenin optimum su muhtevasının %4,7 olduğu, iyi derecelenmiş olan numunenin optimum su muhtevasının ise %6 olduğu belirlenmiştir. Yapılan CBR deneyinde ise iyi derecelenmemiş çelik cürufu numunesinin CBR değeri %110, kötü derecelenmiş çelik cürufu numunesinin CBR değeri ise %270 olduğu yapılan deneyle ölçülmüştür. Los Angeles aşınma deneyi, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmış ve yaklaşık 8 ay boyunca gözlemlenmiştir. Kötü derecelenmiş çelik cürufu numunesinin şişme potansiyeli testinde şişme yerine büzülme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu anormalliğin ince agrega olmamasından kaynaklı yeterli sıkıştırılma sağlanamamasının sebep olduğu düşünülmekte ve doğal şişme davranışı gerçekleştirmediği gözlemlenmektedir. Amerikan standardına göre şişmenin suya batırıldıktan 168 saat sonra %0,5'i geçmemesi istenmektedir. Bu sebeple kullanılacak çelik cürufun Brezilya iklim şartlarında en az 4 ay açık havada neme maruz bırakılarak bekletildikten sonra kullanılması gerektiği önerilmiştir. Ayrıca şişme potansiyelinin kontrolünde iyi derecelendirilmiş dane dağılımına sahip olmanın önemli olduğu vurgulanmıştır.

Geniş deneysel taramaların sonucunda gerekli önlemler alındığında yol kaplamasında doğal agrega yerine EAF türü çelik cürufu kullanılabileceği kanıtlanmıştır.

Andreas ve diğerleri (2005) çalışmalarında İsviçre yerel yönetimlerinin de desteğiyle Hogfors'ta 5000 m²'lik zararsız katı atık sahasının kaplama yapısının bileşeni olarak EAF çelik cürufunun kullanımını irdelemişlerdir. Katı atık sınıfı 1 ve 2 için İsviçre şartnamelerinin gerektirdiği maksimum sızdırma miktarına uygun olarak depolama sahası katmanları tasarlanmış ve katmanların görevleri alternatifleriyle birlikte belirtilmiştir. Saha deneyleri ağırlıklı olmak üzere, saha ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneyler aynı fabrikadan temin edilmiş farklı dane dağılım grafiklerine sahip dört EAF çelik cürufu numunesi ve bir BOF çelik cürufu numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan elek analizinde cürufların temin edildiği fabrikada 20mm'den küçük parçalara ayrıldığı ve benzer dane dağılım grafiklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

EAF1, EAF2, EAF3'ün optimum su muhtevalarının kısıtlı aralıkta olduğu ve su muhtevasının ayarlanırken dikkat edilmesi gerektiği, su muhtevasının su iletkenliği ile aynı derecede etki etmediği, kompaksiyonun su eklendiği anda hemen yapılmasının sıkışmayı kötü etkilediği sonuçlarına varılmıştır. Ancak daha geniş çaplı gözlemlerin uzun dönemde cürufun etkileri üzerine daha kapsamlı bilgiler vereceği belirtilmiştir.

Çağlar (2007) çalışmasında endüstriyel katı atık malzemelerin yol inşasında atık statüsünden çıkarılıp kullanılması durumunda sağlanan ekonomik ve çevresel alandaki faydalarına değinmiştir. Endüstriyel katı atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birlikte teknik özelliklerinin detayları verilmiştir. Türkiye ve Dünya'da kullanım alanı bulan atıkların uygulama örnekleri anlatılmıştır. Karayollarında kullanılan çeşitli atık malzeme türlerine değinilmiş olsa da bu tezin konusu olan çelik cürufu hakkında yaptığı araştırmada çelik cürufu ile oluşturulan bitümlü karışımların yüksek stabiliteye sahip olduğu, karışımların soyulmaya ve neme karşı dayanımlı, yorulma ömrü daha uzun kararlı yapıya sahip tekerlek izine dirençli yüzeyler elde edildiğinden bahsedilmiştir. Çelik cürufunun da kullanıldığı karışımlar ile hazırlanmış taban zemininde üstün performans görülen çalışmalar aktarılmıştır. Ayrıca çelik cürufunun yüksek şişme potansiyelinden ve yüksek birim hacim ağırlığa sahip olması sebebiyle taşıma maliyetini arttırmasından negatif yönleri olarak bahsedilmiştir.

Yıldırım ve Prezzi (2009) çelik cürufu ile ilgili kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının temel amacı; geleneksel geoteknik malzemeler yerine demir-çelik üretimi sonucu ortaya çıkan ve granüler bir malzeme olan çelik cürufunun kullanılmasının uygun olup olmayacağını özgül ağırlık, elek analizi, XRD, kompaksiyon , maksimum ve minimum yoğunluk, büyük ölçekli doğrudan kesme, konsolide drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve şişme deneyleri yaparak mineralojik, morfolojik, indeks ve mekanik özelliklerini şartname sınır değerleri içinde kalıp kalmadığını değerlendirmişlerdir. Bu deneyleri iki farklı çelik üretim sürecinde kullanılan fırınlardan dolayı daha yüksek CaO bulunduran bazik oksijen fırını çelik cürufu (BOF) ve elektrik arklı fırını çelik cürufu (EAF) kullanılmıştır. Ayrıca bu cürufların da kendi içlerinde taze ve yaşlandırılmış olmak üzere temsili numuneler seçerek bir dizi laboratuvar deneyi ile mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca çelik cürufları (BOF ve EAF) ve uçucu kül ile karışımlar hazırlamışlardır. Bu deneysel çalışmaların sonucunda BOF ve EAF cüruflarının dane dağılımları serilere göre değişmiş olsa da siltten çakıla kadar iyi derecelenmiş dağılıma sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. BOF cüruflarının kompaksiyon eğrileri şekil olarak düzensiz olduğunu ve optimum su muhtevası değerlerinin %4-8 değerleri arasında olduğunu ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının $19.5-21 \text{ kN/m}^3$ arasında değiştiğini, EAF cüruflarının ise optimum su muhtevası değerlerinin %11-13 arasında olduğunu ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının $16,8-20 \text{ kN/m}^3$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. BOF cüruflarının özgül ağırlıkları 3,29-3,34 aralığında olup EAF cüruflarının ise taze olanın özgül ağırlığı 2,73 yaşlı olanın ise 3,04 olduğunu belirlemişlerdir. Aralarındaki farkın ise hidrasyon sebebiyle oluşan kimyasal bileşim değişikliğinden olduğunu belirtmişlerdir. Kesme dayanım parametreleri büyük ölçekli kesme testi ve üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre kritik durum BOF cürufunun içsel sürtünme açısının 43° 'den, EAF cürufununkinin ise 40° 'den büyük olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Çelik cürufu numunelerine yapılan uzun dönem şişme testlerinde; taze BOF cürufu numunelerinin yaşlandırılmış BOF cürufunun 17 ay sonunda %0,5 ile %1,3 değerleri arasında şişme gösterip şişmesinin durduğu gözlenirken, taze BOF cürufu numunesinin %0,66 ile %3,5 arasında şişme gösterdiği gözlemlenmiştir. Taze EAF cürufu numunelerinin 1 ay yaşlandırılmış EAF cürufunun 16,5 ay sonunda %0,83 şişme gösterdiği, taze EAF cürufu numunesinin 16 ay sonunda %0,93 şişme gösterdiği gözlemlenmiştir.

G.Wang, Y.Wang ve Gao (2010); inşaat sektöründe geniş kullanım alanı olan çelik cürufunun; özellikle granüler malzeme olarak yol temel ve alt temelinde kullanımlarında,

agrega olarak asfalt karışımlarında, kaplama tabakasında kullanılabilir bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Kullanımının yaygınlaşması için mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve kullanılacağı uygulamaya göre parametrelerinin değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çelik cürufu granüler malzeme olarak agregalara karşılaştırıldığında şartname sınır şartlarını sağlasa da şişme potansiyelinin agregalara göre yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Çalışmalarında; çelik cürufunun su ile karşılaştığında şişme potansiyelini sürşarj yükü varken ve yokken test etmişlerdir. Çelik cürufun bünyesindeki serbest CaO ile şişme potansiyeli arasındaki ilişkiyi teorik olarak örtüşüp örtüşmediğini incelemişlerdir. Çelik cürufunun teorik olarak şişme potansiyelini; hidrasyon sürecindeki kimyasal ve fiziksel değişimlere dayandırmışlardır. Laboratuvarında yapılan şişme potansiyeli deneylerinden elde edilen sonuçlar ile teorik genleşme teorisini karşılaştırdıklarında birbirleriyle örtüştüğünü gözlemlemişlerdir. Dahası sürşarj yükü altında genleşen çelik cürufunun boşluk oranı genleşmeyi absorbe ederek görünen hacimsel genleşmenin neredeyse sıfır olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Serbest CaO 'ten bağımsız olarak çelik cürufunun hacimsel genleşmesini ve hacimsel genleşmeyi absorbe edebilen minimum hacim yüzdesini temel alan değerlendirme ölçütü geliştirmiştir ve bu kriterler çelik cürufu ve hacimsel genleşmeye yatkın, demir içermeyen cürufların karayollarında granüler malzeme olarak kullanıldığı durumlarda rehber olarak kullanılabilir olduğunu ve minimum absorbe edilebilecek boşluk hacminin ise yaklaşık olarak %7,5 olduğunu belirlemişlerdir.

Pasetto ve Baldo (2010), bir çelik cürufu türü olan EAF (elektrik ark fırını) yol kaplaması yapımında agrega olarak kullanımının uygun olup olmadığını analiz etmek için çalışmışlardır. EAF çelik cürufu, doğal agrega (kırılmış kireçtaşı ve kum), çimento olmak üzere üç materyal kullanmışlardır. İki farklı kaynaktan temin edilmiş olan EAF çelik cüruflarını ZC1 ve ZC4 olarak isimlendirmişlerdir. ZC1 ve ZC4 numunelerinin kimyasal kompozisyonunu belirlemek için XRF (X-Ray Fluorescence) tekniğini kullanarak, toksik karakterlerini ise ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer) metodolojisi ile TLCP (Toxic Characteristic Leachability Procedure) standardına göre ağır metalleri sızdırıp sızdırmadığını belirlemişlerdir. Çıkan sonuçlarda ZC1 ve ZC4 'ün çok benzer kimyasal kompozisyonuna sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.2. EAF çelik cürufu kimyasal içeriği (Pasetto ve Baldo, 2010)

EAF	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO
ZC1	3,599	9,152	13,090	29,640	0,350	4,085	5,201	32,740
ZC2	3,612	9,338	13,010	29,610	0,358	4,016	5,074	32,780

ZC4 numunesinin daha çok ağır metal içerdiği görülmüştür. İki numunede yüksek bakır, çinko ve kroma sahip olduğu ve kromun aralarındaki en baskın metal olduğu görülmüştür. Sızdırma testinde ise İtalya Çevresel sınırları (Legislative Decree No 152/2006) içerisinde kaldığı ve toksik herhangi bir problem yaratıp yaratmayacağı test edilmiştir. ZC1 ve ZC4 numunelerine, kireç taşı ve kumun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen bir dizi testlere tabi tutulmuş ve elde edilen değerlere göre doğal agrega yerine tercih edilebileceği ispat edilmiştir. ZC4 çelik cürufu numunesinin Los Angeles aşınma katsayısı ve donma-çözünme dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. CNR 29-72 'ye göre uygun granülometride hazırlanan karışımlar CNR 69-78 standardına göre modifiye proktor testi uygulanmış ve optimum su muhtevası değeri %2,7, rölatif kuru birim hacim ağırlığı ise $2,784 \text{ kg/dm}^3$ bulunmuştur.

Juckes (2003) çelik cürufu türleri, yapım aşamaları ve mineralojik kompozisyonlarını araştırmış ve çelik cüruflarının şişme potansiyeli üzerinde çalışmıştır. Üretilen her 1 ton çelikten katı atık olarak ortaya çıkan yaklaşık olarak 100 kg cürufun, volkanik kayalara ve doğal agregalara olan benzerliği yol inşasında her katmanda kullanılabileceği fikrini ortaya çıkartmıştır. Ayrıca dolgu malzemesi olarak kullanılması, demir yolu balastında, dalgakıran olarak ve arıtma tesisinde filtre malzemesi olarak kullanılması durumunda gerekli olan bilgileri literatürden araştırıp karşılaştırmalı sunmuştur. Modern BOF ve EAF çelik cüruflarının mineralojik ve kimyasal yapısını incelemiş ve çelik cürufu mineralojisinin Portland çimento klinkeri ile benzer özelliğe sahip olabileceği düşünülse de yapılan testler göstermiştir ki çimentoya benzer davranış göstermemektedir. Çalışmada çelik cüruflarının içeriğindeki serbest kireç ve serbest MgO şişme davranışını belirleyen temel etken olduğu buna bağlı olarak cürufların içeriğindeki serbest CaO oranı ile şişme değerlerini karşılaştıran bir tablo verilmiştir. En çok şişme gösteren cürufun en fazla serbest kirece sahip olan olduğu görülmektedir. Ek olarak çelik cüruflarının zayıf noktası olan yüksek şişme potansiyelini düşürmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Brand ve Roesler (2015) endüstriyel bir atık olan çelik cürufunun içeriğindeki serbest CaO ve MgO' in sebep olduğu yüksek şişme potansiyelinden dolayı sınır şartları olan uygulamalarda tercih edilmediğini görmüşlerdir. Ancak Kuzey Amerika'da çelik cürufu kullanılarak üretilmiş econo-crete ve dolguların başarılı sonuç verdiği rapor edilmiş, ayrıca İspanya'daki Labein-Tecnaile binası çelik cürufunun agrega olarak kullanıldığı betondan yapılmıştır.

Çalışmalarında BOF, EAF ve EAF/LMF türü çelik cüruflarının kimyasal ve mineralojik yapısını, şişme potansiyelini ve serbest oksit içeriklerini belirlemek için bir dizi test yapmışlardır. Ek olarak çelik cürufu agregası kullanılarak üretilen beton karışımları üzerinde kopma, kırılma dayanımı, donma-çözülme dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Agregaların fiziksel özelliklerini ASTM standartlarına göre belirlemişlerdir. Çelik cüruflarının doğal agregalara göre daha yüksek özgül ağırlık ve birim hacim ağırlığa sahip olduğu, emme kapasitesinin ise dolomit ile benzer özellik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kimyasal ve mineralojik karakterizasyonunu Powder X-Ray Diffraction (XRD) yöntemi ile belirlemişler ve BOF çelik cürufunun tipik olarak en yüksek CaO oranına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. ASTM D4792'deki agregalar için hazırlanmış klasik şişme testi uygulanmıştır ve doğal agregalara göre daha fazla şiştiği gözlemlenmiştir. Ancak MgO 'tin hidratasyonunun ASTM D4792'de önerilen 7 günlük süreden daha uzun sürdüğü bilindiğinden Edw. Levy Co. tarafından geliştirilmiş olan test protokolüne uyularak autoclave şişme testine tabi tutulmuştur. Alınan sonuçlarda içeriğindeki daha önce test edilip belirlenmiş CaO oranlarıyla doğru orantılı olarak en fazla şişme %8 ile BOF cürufunda olmuştur. Çelik cürufu agregalarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, şişme potansiyeli test edilip değerlendirildikten sonra çelik cürufu agregalarının betonda kullanımı incelenmiştir. Yüksek şişme potansiyeline sahip BOF çelik cürufu yerine düşük CaO içeriğine sahip olan EAF çelik cürufunun kullanımı önerilmiş ve kullanılmadan önce şişme potansiyelini düşürmek için buharla yaşlandırma, stokta ıslak yaşlandırma gibi yöntemlerin uygulanabileceği belirtilmiştir. Önlemler alındıktan sonra çelik cürufu agregaları kullanılarak hazırlanan betonların doğal agrega ile hazırlanan karışımla dayanım özellikleri karşılaştırılmış ve güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Hasançebioglu (2014) yaptığı çalışmada Ege Çelik Endüstrisi tesislerinde üretilen ve çelik üretiminden ortaya çıkan katı atık malzeme türü olan elektrik arkı ocağı çelik cürufu EAO cüruflarının, karayolu inşaatında dolgu malzemesi ya da granüler katmanlarda yapay agrega

olarak kullanılması durumunda cürufun fiziksel özelliklerinin Karayolları Teknik Şartnamesi sınırlarında kalıp kalmadığını incelenmiştir. Elek analizi sonucunda 0,075 mm elekten geçen malzeme oranının %4 olduğu belirlenmiş ve bu değerin Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen %12 sınırını aşmamış olduğu görülmüştür. Özgül ağırlık deneyi sonucunda ise EAO çelik cürufunun içeriğindeki demir sebebiyle özgül ağırlığının doğal agregayla karşılaştırıldığında daha yüksek özgül ağırlığa sahip olduğu görülmüştür. Su emme deneylerinde ise şartname sınır değerlerini aşmış olup donma deneyinde ise şartname sınır değerlerini aşmadığı görülmüştür. Los Angeles aşınma deneyinde ise EAF çelik cürufunun köşeli yapısından dolayı doğal agregaya göre daha yüksek çıktığı ve şartname sınır değerler içinde kaldığı görülmüştür. Yassılık indeksi deneyinde de doğal agregaya göre daha iyi sonuçlar vererek şartname sınır değerleri içinde olduğu gözlemlenmiştir.

Fırat, Yılmaz, Vural, Khatib ve Umu (2015) yaptıkları çalışmada demir-çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelikhane cürufu ile termik santrallerde linyit kömürünün yakılmasından ortaya çıkan uçucu külü, kireç oranını ağırlıkça %5 sabit tutarak, yol dolgu malzemesi olarak kullanılan kaolinit kili ile çeşitli oranlarda karıştırarak deneyler yapmışlardır. Çalışma metotları kısaca şu şekildedir. 4 nolu elekten geçirilen ve etüvde kurutulan (+110 °C’de) kaolinit kili, uçucu kül, çelikhane cürufu ve kireç ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılmıştır. Sonuçları doğru değerlendirmek amacıyla hazırlanan kontrol numunesi (Z1) tamamen kaolinit kilinden olmak üzere katkısız hazırlanmıştır. Numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları standart kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Sonuçlar katkısız kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında diğer tüm katkılı numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları katkısız numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumu çelik cürufu ve uçucu kül katkı malzemeleriyle oluşturulan dane dağılımının, sıkıştırma sırasında boşluk oranını azaltarak uygulanan enerjiden maksimum fayda sağlanması ile açıklamışlardır. Standart kompaksiyon ile optimum su muhtevaları belirlenen numuneler, belirlenen değerlere göre sıkıştırılıp ASTM D 2166-06’ ya göre serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Numunelere 7 ve 28 gün olmak üzere kür uygulanmış olup, taşıma kapasitesi değerlerinin daha yüksek olacağı öngörülen Z4, Z6 ve Z7 numunelerinin kür süreleri 56 güne kadar uzatılmıştır. İçeriğinde ağırlıkça %40-45 oranında çelikhane cürufu ve uçucu kül içeriği olan Z4, Z6 ve Z7 numunelerinde serbest basınç taşıma kapasitelerinde başlangıç değerlerine göre çok yüksek bir artış gözlemlenmiştir. Daha sonra optimum su muhtevaları ile hazırlanıp sıkıştırılmış ve kür uygulanmış numunelere ASTM D1883-07 standardına göre Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi uygulanmıştır. Çıkan sonuçlarda 56 gün

kür uygulanan Z4 ve Z6 numunelerinin CBR değerlerinin katkısız kontrol numunesine göre %250 daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chen, D.Lin, Z.Lin ve Luo (2017) çalışmalarında çelik cürufunun yol mühendisliği projelerinde kullanımında uzun dönem davranışlarını irdelemektedirler. Asfalt kaplamasında kullanılan doğal agregayı %20, %40, %60 oranlarında BOF türü çelik cürufu agregası ile karıştırarak ve %0 kontrol grubu olmak üzere deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bunlar;

- AASHTO T180'e göre maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasının belirlenmesi,
- ASTM D1883'e göre taşıma gücü belirlemek için CBR testi
- CNS 15311'e göre şişme potansiyeli testidir.

Test sonuçlarına göre 0, 20, 40, 60 karışımları için sırasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık 2,32; 2,32; 2,35; 2,45 gr/cm^3 olduğu gözlenmiştir. BOF çelik cürufunun özgül ağırlığı doğal agregadan yüksek olduğu için BOF oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlığın arttığı gözlemlenmiştir. Optimum su muhtevası değerlerinin ise sırasıyla %7, %6,61, %4,9 ve %6,4 olduğu belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numuneler 7 gün boyunca suya batırılmış ve hacimsel genleşmeleri gözlemlenmiştir. Sonuçlarda %20'lik karışımın %0,38; %40'lık karışımın %0,47; %60'lık karışımın %0,55 şişme gösterdiği saptanmıştır. Yapılan CBR testinde ise %20'lik karışımın taşıma gücünü arttırdığı ancak diğerlerinin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

Zumrawi ve Babikir (2017) çalışmalarında; şişme potansiyeli yüksek kille %0, %5, %10, %20, %30 oranlarında çelik cürufu katıldığı kilin mühendislik özelliklerine etkisini gözlemlemişlerdir. Khartoum, Buri'den alınan koyu gri, sıkı, siltli kil ile Giod Çelik Fabrikasından alınan çelik cürufu çeşitli oranlarda karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde İngiliz standartları baz alınmıştır. Yapılan kıvam limitleri deneylerinde eklenen çelik cürufu miktarı arttıkça likit limit değeri düşerken, plastik limit değerinde artış gözlenmiştir. %30 oranında çelik cürufu eklenen numunenin LL değerinin %33 olduğu belirlenmiştir. Şişen zeminlerde en önemli parametre olan serbest şişme endeksi %0 çelik cürufu bulunan numunede %140 iken çelik cüruf miktarı arttıkça %55 'e kadar düştüğü görülmüştür. Yapılan kompaksiyon testlerinde maksimum kuru birim hacim ağırlığın %10'a kadar yükselebildiği ve bunun çelik cürufunun su absorbe etme yeteneğinin yüksek

olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu araştırmaya göre şişme potansiyeli yüksek kil zeminlerde belirli oranlardaki çelik cürufu eklenerek şişme potansiyelinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Soyonar, Fırat, Yılmaz ve Okur (2018) çalışmalarında 4 nolu elekten geçen uçucu kül, çelikhane cürufu ve kaolinit kilini açık havada kuruttuktan sonra ağırlıkça %5 olmak üzere kaolinit oranını sabit tutarak 5 adet karışım hazırlamışlardır. %5 kaolinit, %95 çelikhane cürufu ve %0 uçucu kül ile başlayıp çelikhane cürufu oranını %75'e kadar %5 oranla düşürüp yerine uçucu kül ekleyerek 5 tip karışım hazırlamışlardır. ASTM D698'e göre standart kompaksiyon uygulanan numunelerde %95 çelikhane cürufu içeriği olan numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip olduğu ve çelikhane cürufu oranı düşürüldükçe maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Daha sonra optimum su muhtevasında 3 katmanda CBR kalıplarında sıkıştırılan numunelere ASTM D1883-07 standardına göre Kaliforniya taşıma oranı deneyi uygulanmıştır. Numunelere 7, 28 ve 56 gün olmak üzere kür uygulandıktan sonra yeniden CBR deneyi ile taşıma oranları ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre ulaşılan sonuçlar şu şekildedir. Uçucu kül oranının yüksek olduğu karışımda (%20 uçucu kül, %5 kaolinit ve %75 çelik cürufu) puzolanik aktivitenin uçucu kül miktarıyla doğru orantılı olarak artmasından dolayı CBR değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada %75 oranında çelikhane cürufu ile %20 oranında uçucu kül ve dolguya uygun bir zemin malzemesi ile karışım hazırlandığında CBR sonuçlarında %130 oranında bir artış görüldüğü ve çelikhane cürufunun güvenle yol dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Karadağ, Fırat ve Işık (2020) yaptıkları çalışmada çelik cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması durumunda yol kesitini sonlu elemanlar yöntemiyle ve aksisimetrik analiz kullanarak davranışını dört farklı kesit üzerinden araştırmışlardır. Referans olması için kesitlerden biri temel ve alttemelin tamamı kırmataştan oluşturulmuş yol üst yapısı kesitidir. Diğer üç kesit ise; kırmataş temel-cüruf alttemel, cüruf temel-kırmataş alttemel, cüruf temel-cüruf alttemel olmak üzere oluşturulan yol kesitleri olup, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis ile davranışlarını analiz etmişlerdir. Dayanım parametreleri ise literatürden temin edilmiştir. Sonuç olarak oluşan düşey deformasyonların yatay ve düşey eksenindeki şekli dört farklı kesitte de yaklaşık olduğu fakat deformasyon miktarlarının farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca maksimum oturmaların asfalt yüzeyinde lastik orta noktasında oluşurken, yatay eksenindeki oturmalar

kesite göre değişerek, yaklaşık 1,0 ile 1,5 metrede sıfırlandığı görölmüştür. 1,5 metre ile 2,5 metre arasında ise kabarmalar oluşmuştur. Kabarmalar 1,5 metreden sonra azalmakta ve lastik orta noktasından itibaren yaklaşık 2,5 metrede sıfırlanmaktadır. Kesitlerin sonuçları karşılaştırıldığında tekrarlı yükleme altında en iyi performansı kırmataş temel ve çelik cürufundan oluşan alttemelin oluşturduğu kesit göstermiştir. Bu kesitte kabarmalar çok az oluşurken oturmaların 22 mm seviyesinde olduğu okunmaktadır. Temel ve alttemelin tamamen kırmataştan oluştuğu yol kesitinin yaptığı en fazla oturma miktarı 27 mm olarak okunmuştur. Temel kırmataş alt temel çelik cürufu olan kesit ile tamamen kırmataş olan yol kesitinin oturma değerleri karşılaştırıldığında alttemeli cüruf olan kesitin %18 daha az oturma gösterdiği ve çelik cürufu temel ve alttemelde birlikte kullanıldığında oluşan oturmaların ise tamamen kırmataş ile oluşturulan yol kesiti ile aynı değerlerde oturma gösterdiği görölmüştür. Sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde ise çelik cürufunun doğal agrega yerine yol üst yapısında güvenle kullanılabilceği kanıtlanmış olup yalnızca alttemelde kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansı artmakta hem de doğal kaynakların tüketimi azaltılıp katı atık madde olan çelik cürufunun geri dönüşümü sağlanacaktır.

2.1. Çelik Cürufunun Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi

Çelik üretiminde en büyük payı Bazık Oksijen Fırını tesisler ve Elektrik Arklı Ocaklı tesisler oluşturmaktadır. İki üretim sürecinin de ortalama olarak ton başına en az %10-15 oranında çelik cürufu ortaya çıkmaktadır. Fabrikaların kendi bünyesinde kurduğu Ar-Ge birimlerinin çalışmaları ile ortaya çıkan atık miktarlarında iyileşmeler olmaktadır. Japonya'nın en büyük çelik üreticilerinden olan NKK firması "Zero Slag Proses" (ZSP) adı altında geliştirdikleri teknolojiye üretilen 1 ton çelik başına ortaya çıkan cüruf miktarını 10 kg'a kadar düşürmeyi başarmışlardır. (Tanabe ve Nakada, 2003) Ancak bu teknoloji Dünya üzerinde çok fazla yaygınlaşmadığı için çelik cürufları hala katı atık depolarında günden güne çoğalmakta olup geri dönüştürölmeyi bekleyen ve çevresel sorunlara sebep olan yığınlardır. Çelik cürufu agregaları teknik özellikleri açısından oldukça iyi performans göstermesine rağmen yüksek şişme potansiyeli kullanımında göz önünde bulundurulması gereken birincil kriterdir.

Çelik cürufları yaklaşık olarak 1600 °C' de oluşurlar ve soğuma süreçleri yapılarını etkiler. Çelik üreten her fabrikanın cüruf soğutma hikayesi detaylarda farklılık gösterse bile ana

çerçevede aynı yolu izlerler. Bazik oksijen fırını aracılığıyla çelik üreten fabrikalar oluşan sıcak sıvı cürufu kazanlardan kepçe ile çukurlara alınır ve soğumaya bırakırlar. Genellikle üzerine su püskürtülerek soğumaları hızlandırılır. Değişik soğutma süreçleri cüruflarda doku ve porozite farkları oluşturur.

Çelik cürufu agregalarının birçok uygulamada kullanılabileceği yıllardır bilinmesine rağmen yaygın kullanılmadığı için atık depolama alanlarında depolanmaya devam edilmektedir. Toprak set veya duvarların ardına depolanan soğutulmuş çelik cüruflarının açık havada yeteri kadar bekletildikten sonra kırım ve eleme işlemleri gerçekleşir. Cüruf yığınları önemli miktarda metalik parça ve kırıntılar içerebilir. Bu nedenle manyetik ayırıştırma yoluyla parçalar yeniden değerlendirilmek amacıyla toplanır. Elenen cüruflar boyutlarına göre kategorize edilir ve uygulamalarda kullanılması için önerilen yaşlandırma süresi kadar açık havada bekletilir.

Mekanik özelliklerinin doğal agregalarla karşılaştırıldığında çelik cürufunun uygun olduğu ancak mineralojisindeki oksitler yüksek şişme potansiyeline sebep olduğundan uygulamalarda kullanılmadan önce şişme potansiyelinin belirlenmesi proje güvenliği açısından kilit önem taşımaktadır. İdeal olan uygulamadaki şartların en yakın şekilde şartların sağlanması ve hacimsel genleşme davranışının uzun dönem gözlem altında tutulmasıdır. Çıkan sonuçlara göre tasarım yapılmasıdır. Çelik cürufunun içeriğindeki serbest CaO ve MgO hidrate olabilen ayrıca içeriğindeki kalsiyum silikatlar da suyla reaksiyona giren maddeler olup bu çalışmanın amacı olan çelik cürufunun şişme potansiyelindeki ana etkenlerdir. Çelik cürufunun şişme potansiyeli çelik cürufunun şişme potansiyeli birincil olarak mineralojisine bağlı olmakla birlikte cürufun temin edildiği fabrikaya, tane büyüklüğüne, dane dağılımına ve yaşlandırma süresine bağlıdır. Önceki araştırmalar gösteriyor ki yeterince yaşlandırılmış numunelerin şişme potansiyellerinin azaldığı görülmektedir. Çelik cürufunun mineralojisindeki kararsız fazlardan dolayı su ile karşılaştığında şişme potansiyeli yüksektir. Su ile karşılaştığında şişmeye sebep olan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;

- $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
- $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$
- $\beta - C_2S \rightarrow \alpha - C_2S$

- $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$
- $Mg(OH)_2 + CO_2 \rightarrow MgCO_3 + H_2O$
- $Fe + O \rightarrow FeO$

Ancak literatürde çelik cürufunun hacimsel genişlemesine neden olan en büyük etken içeriğindeki serbest kirecin (CaO) su ile hidrasyonudur. Ortamda su bulunması durumunda serbest CaO $Ca(OH)_2$ 'de dönüşür. $Ca(OH)_2$ 'nin yoğunluğu CaO 'de göre daha düşüktür. Bu sebeple CaO 'nin H_2O ile reaksiyona girmesi sonucu hacimsel genişleme meydana gelir. Çelik cürufunda serbest CaO olmasının iki ana sebebi vardır.

1.Hammaddenin çökmesi

2.Soğutma işlemi sırasında C_3S 'nin C_2S dönüşmesi

Ramachandran ve arkadaşları (1964) CaO 'nin suya daldırıldığındaki hidrasyon mekanizması üzerinde çalışmışlardır. Sıkıştırılmış CaO birkaç gün içinde neredeyse tamamının hidrasyona uğradığını ve hacimsel genişleme gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada serbest kireç su buharına maruz bırakıldığında daha fazla hacimsel genişleme gösterdiği kanıtlanmıştır. Çelik cürufunun içeriğinde bulunan serbest kirecin (CaO) agrega içerisinde gözle görülebilir şekilde cepler oluşturabildiği görülür ve bu ceplere çatlaklar sayesinde su ulaşırsa orantısız hacimsel genişleme oluşur. Çelik cürufunun hacimsel genişlemesinin büyük kısmı serbest CaO yüzünden olsa da içeriğindeki MgO de uzun dönemde şişme potansiyelinde etkilidir.



Resim 2.1. Çelik cürufu içinde cep yapmış serbest kireç (Yıldırım ve Prezzi, 2009)

Crawford ve Burn (1969) bir yapının temel dolgusunda kullanılan open-heart tipi çelik cürufunun bir yıl sonra hacimsel genleşme gösterip yapıya zarar veren çelik cürufu dolgusu üzerinde çalışmışlardır. Open-heart türü çelik cürufunun içeriğindeki yüksek MgO oranı uzun dönemde dolgunun şişmesine sebep olmuş ve yapıya zarar vermiştir. Open-heart tipi çelik cürufu artık üretilmemekle birlikte yeni dönem çelik cürufları yüksek MgO içeriğine sahip değildir. Eğer eritken madde olarak CaO yerine dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) kullanılırsa cüruf içeriğindeki serbest MgO oranı artar ve buna bağlı olarak hacimsel genleşme ihtimali yükselir. Geiseler ve arkadaşları (1996) çelik cüruflarını içeriğindeki MgO oranlarına göre kategorize edilip uygun olanın seçilerek kullanılması gerektiğini önermişlerdir.

Çelik cürufu içeriğindeki MgO 'tin tamamı serbest değildir. Ayrıca MgO, FeO ve MnO ile katı çözelti içinde (karışık kristal formunda) bulunur. Eğer katı çözelti içindeki MgO oranı %40 üzerinde ise kristalin de şişme potansiyeli o oranda artar. Ancak bu kristaller genellikle düşük MgO oranına sahip olup iç kısımlara gömülen MgO su veya nemden uzak kaldığı için hidratasyonu hemen tamamlanamaz. Bu sebeple uzun dönem şişme potansiyelinde serbest MgO (periklaz) etkindir.

Şişmeye neden olan bir diğer reaksiyon ise C_2S fazıdır. C_2S fazı yaygın olarak bütün çelik cürufu türlerinde bulunur. C_2S dört polimorf (çok kristalli) yapıda bulunur. Bunlar $\alpha, \alpha', \beta, \delta$ 'dır. α fazı yüksek sıcaklıkta ($>630^\circ C$) stabildir. Çelik cürufu soğurken sıcaklık $630^\circ C$ 'den aşağıya düşerse $\alpha - C_2S$ fazı $\beta - C_2S$ fazına dönüşür. Soğuma sürecinde sıcaklık $500^\circ C$ 'ye düştüğünde ise $\beta - C_2S$ fazı $\delta - C_2S$ fazına dönüşür. Bu dönüşüm %10 oranında hacimsel genleşme oluşturur. Eğer çelik cürufunun soğuma süreci yavaş gelişirse kristal yapı kopar ve büyük miktarda toz oluşur. Bu faz dönüşümü pota cüruflarında tipik olarak görülür. BOF çelik cüruflarında ise $\beta - C_2S$ fazı gözlemlenir ancak fosfor içeriğinden dolayı daha stabildir. Oksidasyon ve karbonatlaşma çelik cürufunun hacimsel genleşmesine sebep olan bir başka etkindir. Eğer çelik cürufları açık havada depolanır ve yaşlandırılırsa $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$ havadaki CO_2 'di absorbe edebilirler ancak bu olay sadece dış kabukta gerçekleşebilmekte ve mikroskop aracılığı ile gözlenebilmektedir. Hidratasyon sonucunda oluşmuş olan çatlaklara astar görevi görürler. Karbonatlaşma çelik cürufunun hacimsel

genleşmesine sebep olur. Karbonatlaşmaya benzer bir diğer reaksiyonda FeO ‘de gözlemlenmiştir. FeO çeşitli şekillerde oksidasyona uğrar ve sonucunda Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $Fe(OH)_2$ oluşabilir. Ancak literatürde bu reaksiyonlardan kaynaklanan hacimsel genleşme ile ilgili çok fazla bilgiye ulaşamamıştır. Hidratasyon ile kıyaslandığında karbonatlaşma ve oksidasyon reaksiyonlarının sebep olduğu hacimsel genleşme ihmal edilebilecek düzeydedir.

Çelik cürufunun sınır şartları olan ve olmayan uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılması için şişme potansiyelini belirlemek çok önemlidir. Çünkü diğer özellikleri rahatlıkla sınır değerleri sağlarken içeriğindeki serbest CaO ve MgO ’ten dolayı yüksek şişme potansiyeli belirleyici olmaktadır. Bu amaçla, çelik cürufunun şişme potansiyelini belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler iki ana gruba ayrılabilir.

- Uzun Dönem Şişme Testleri
- Hızlandırılmış Şişme Testleri

Uzun dönem şişme testlerinde çelik cürufu numuneleri tipik olarak suya batırılır ve oda sıcaklığında uzun bir süre boyunca şişmeleri gözlemlenir (en az 3-6 ay). Hızlandırılmış şişme testlerinde ise sıkıştırılmış çelik cürufu şişme hızını arttırmak için numuneler sıcak suya veya buhara maruz kalır ve şişme daha kısa bir süre için izlenir. (Tipik olarak 2 ila 14 gün arasında değişir.) Her iki tür şişme testi (uzun dönemi ve hızlandırılmış) yöntemlerinde, çelik cüruf örnekleri tipik olarak silindirik kalıplarda sıkıştırılır ve bir boyutlu hacim değişimi yanal olarak kısıtlanır ve numuneler gözlemlenir. Hem uzun dönem hem de hızlandırılmış testler çelik cüruflarının şişme davranışlarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.1. Uzun dönem şişme testleri

Literatüre bakıldığında araştırmacıların çelik cürufu numunelerinin düşük sıcaklıktaki uzun dönem şişme potansiyelini belirleyebilmek için birtakım testler gerçekleştirdiği görülmektedir. Kullanılan test ekipmanlarında farklılıklar görölse de aynı prensiplere dayanmaktadır. Numuneler istenen kuru birim hacim ağırlıkta farklı boyutlardaki silindirik kalıplarda sıkıştırılır. Kalıplar sayesinde yanal deplasman engellenir. Numune hazırlama

tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığındaki su depolarına daldırılır. Numunenin altından ve üstünden olmak üzere suya serbest erişim sağlanır. Sıkıştırılmış cüruf örneklerinin bir boyutlu şişmesi LVDT'ler (Linear Variable Differential Transformer) veya numunenin üstüne monte edilen kadran göstergeleri (komparatör saati) ile ölçülür. Hacim değişimi ölçümleri, günden güne veya birkaç ay arasında değişen sürelerle yapılır. Şişme oranı özellikle, serbest MgO içeriği olan çelik cüruf örnekleri için, testler MgO'din $Mg(OH)_2$ haline dönüşmesi uzun sürdüğü için aylarca izlenmelidir.

Crawford ve Burn 1969'da yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu ve open-heart çelik cürufunun uzun dönem şişme potansiyelini belirlemek için ortam sıcaklığının 15°C ve bağıl nemin %90 olduğu ortamda hazırlanan 2 inç çapında 4 inç yüksekliğindeki silindirik kalıplarda sıkıştırılmış numunelerin tabanından su erişimi sağlanmış ve 150 gün boyunca hacimsel genişlemesini gözlemlemişlerdir.

Yıldırım ve Prezzi 2009'da çalışmalarında EAF ve BOF çelik cüruflarının taze ve yaşlandırılmış numunelerini CBR kalıplarında optimum su muhtevalarında sıkıştırıp üzerlerine yaklaşık olarak 2,5 kPa sürşarj yükü ile oda sıcaklığında suyu daldırıp uzun dönem şişme potansiyellerini 16 ay boyunca gözlemlemişlerdir.



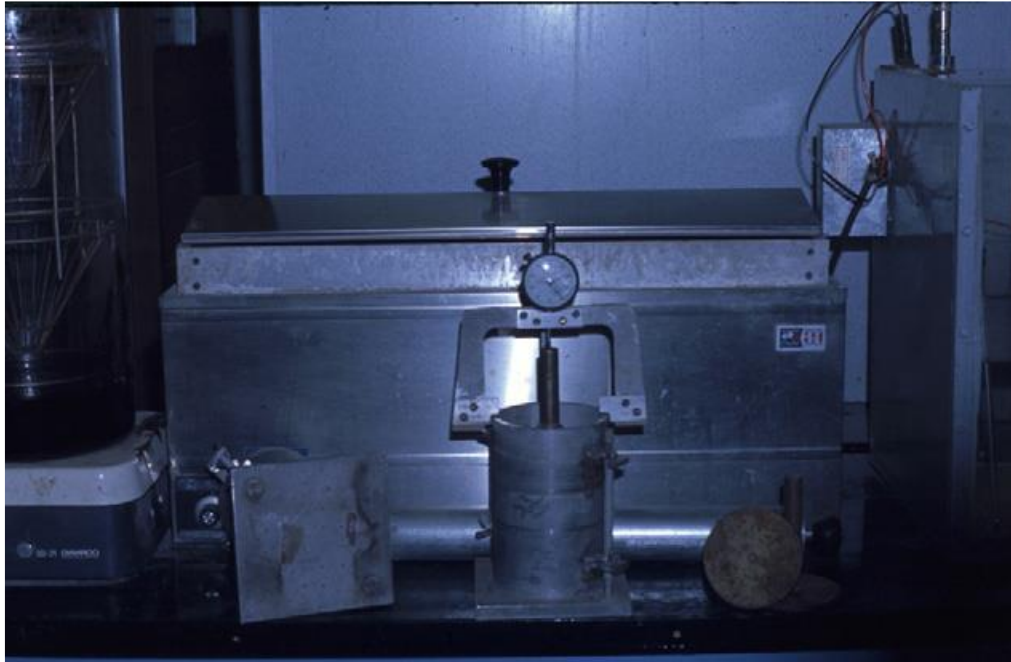
Resim 2.2. Uzun dönem şişme testi kurulumu (Yıldırım, Prezzi 2009)

Juckes 2003'te yaptığı çalışmada hidratasyonun bazı yöntemlerle hızlandırılarak şişme potansiyeli hakkında hızlı fikir edinilebileceğini söylemiştir. Ancak çelik cürufunun uygulamalardaki şartlarını temsil etmeyen hızlandırılmış şişme potansiyeli test sonuçları kullanıldığında gerçek değerlerden uzaklaşıldığını belirtmiştir.

2.1.2. Hızlandırılmış şişme testleri

Su banyosu şişme testi

ASTM D4792 içeriğinde serbest CaO ve MgO gibi hacimsel genleşmeye sebep olan oksitler bulunduran ve yoğun dereceli sıkıştırılmış endüstriyel yan ürün olan agregaların şişme potansiyelini belirlemek için tasarlanmış bir yöntemdir. Bu yöntem optimum su muhtevasına göre sıkıştırılmış numunelerin en az 7 gün boyunca 70 ± 3 °C sıcak su tankına daldırılarak tek yönlü hacimsel genleşmesinin gözlenmesi esasına dayanır. Sıcak su hidratasyonu hızlandırdığı için çelik cürufunun şişme potansiyeli hakkında hızlı bir şekilde fikir edinilebilir. 7 gün sonunda hacimsel genleşme hızında belirgin bir yavaşlama yoksa test devam ettirilir.



Resim 2.3. ASTM D4792 deney ekipmanları (Wang vd. 2010)

Literatür incelendiğinde çelik cürufunun şişme potansiyelini belirlemek için yaygın kullanılan bir yöntem olduğu görülmektedir. Wang ve arkadaşları 2010'da yaptıkları çalışmada ASTM D4792 test metoduna göre 15,24 cm çap, 12,8 cm boy ve $182,4 \text{ cm}^2$ hacmindeki silindirik kalıplarda optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numunelerin 4650 g (25 gr/cm^2) sürşarj yüküyle ve yük olmadan paralel zamanlı deneye tabii tutup 14 gün boyunca gözlemlemişlerdir.

Autoclave şişme testi

Autoclave testi ASTM C151'de sertleşmiş çimento karışımının autoclave şartlarında şişme potansiyelinin tahmini için kullanılan bir yöntemdir. Bu standarttan yola çıkılarak Edw. C. Levy Co. tarafından çelik cürufları için uyarlanmıştır. ASTM D4792 standardına uyularak çelik cürufu agregalarının şişme potansiyeli belirlenmek istendiğinde içeriğindeki MgO'tin hidratasyonunun 7 günden daha uzun sürmesi sebebiyle gerçek değerlere tam olarak ulaşamamaktadır. (Brand ve Roesler, 2015)



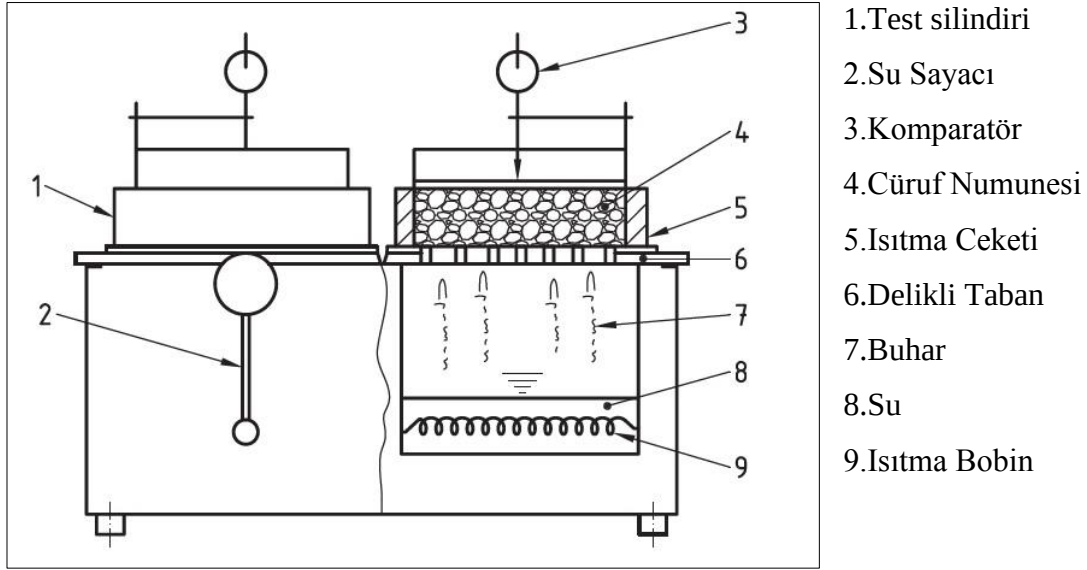
Resim 2.4. Modifiye autoclave makinesi (Yzenas, Cook, 2017)

İçeriğinde hacimsel genleşmeye sebep olan serbest CaO ve MgO gibi oksitler bulunan agregaların hidrasyonunu hızlandırmak için basınç ve sıcaklığın bir arada kullanıldığı yaygın bir yöntemdir. Agregada numuneleri öncelikle autoclave kalıplarında sıkıştırılır ve başlangıç ölçümleri alınır. Autoclave makinesinde 2068 kPa basınç ve 420 °C ısıda 3 saat bekletilir ve soğumaya bırakılır. Nihai ölçümler alınarak şişme miktarı hesaplanır. Ancak su banyosu şişme testine oranla on kat daha fazla şişme gözlenir. Autoclave testi uygulanan çelik cürufları parçalanma göstermektedir ve gerçek saha koşullarını temsil etmediğinden sonuçlara tam olarak saha performansını yansıtmayabilir. Ancak hızlı bir şekilde sonuç alınabildiğinden avantajlıdır. (Yıldırım ve Prezzi, 2009)

Buhar testi

BS EN 1744 standardı başlangıçta agregaların kimyasal özelliklerini belirlemek için düzenlenmiş olup agrega olarak kullanılan çelik cürufu agregaları için de testlerin olduğu bölümler eklenmiştir. Standardın 19. Bölümünde kırılmış çelik cürufunun şişme potansiyelinin belirlenmesinin içeriğindeki serbest kireç ve serbest magnezyum oksidin geç hidrasyonundan kaynaklanması esasına dayanmaktadır. Numunelerin kırılmasının sebebi ise serbest kirecin açığa çıkmasını sağlamaktadır. Yüksek sıcaklık nedeniyle hızlandırılmış bir test olup cürufun şişme potansiyelini ölçülebilir değerlerle elde edilerek çelik cüruflarının uygulamalar için doğru kategorize etmeyi amaçlamaktadır.

Tane dağılımı bilinen her test için 4,5 kg sıkıştırılmış çelik cürufu numuneleri 100 °C'lik ortam basıncında buhar akışına maruz bırakılır. Bu sayede MgO ve CaO reaksiyonları için gerekli nem ve sıcaklık sağlanmış olur. Numunenin buhar hücresinde tutulma süresi numunenin içeriğindeki daha önce standarda göre belirlenmiş olan MgO değerine bağlıdır. %5'ten küçük veya eşit ise 24 saat, %5'ten büyük ise 168 saattir. Bu sürelerin sonunda komparatörden hacim artışı okunur ve kaydedilir. (BS EN 1744)



Şekil 2.3. Şematik buhar testi (BS EN 1744)

2.2. Çelik Cürufunun Şişme Potansiyelinin Düşürülmesi

Çelik cürufu içeriğindeki serbest kireç miktarını düşürmek için yapılan girişimlerin çoğunda çelik üretim sürecine olumsuz etkileri olmuştur. Daha düşük CaO/SiO_2 oranına ulaşmak için kireç CaO veya SiO_2 miktarları azaltılabilir ancak defosforilasyon (fosfor giderme) veriminin azalmasına sebep olur. Daha uzun üfleme süresi bilinen bir serbest kireç CaO içeriğini azaltma yöntemidir. Bu şekilde serbest kireç içeriği azaltılırken erimiş metal okside olur ve çelik cürufunun içeriğine FeO olarak katılır. Kireç kaynağı seçimi de çelik cürufu içeriğindeki kireç içeriğini düşürmede kullanılan hızlı iyileştirme yöntemlerinden birisidir. CaO ve MgO içeriği düşük olan kaynaktan temin edilen cüruflar daha az şişme gösterecektir. Ancak yapılacak kaynak seçimi maliyet açısından makul değerlerde kaldığı sürece uygulanabilir. Eritken malzeme olarak CaO yerine BOF çelik cürufu kullanmak daha iyi özümleme sağlar ancak fosforun geri dönüşümünde kademe sayısında artışa sebep olur. Çoğu fabrikanın üretim felsefesinde efektif çelik üretimi amaçlandığı için çelik cürufunun içeriğinin iyileştirilmesi geri planda kalır.

Çelik cürufunun içeriğindeki serbest kirecin azaltılması için ilk fırsat cüruf potasına transfer edildiğindedir. Serbest kireç içeriğini düşürmek için katkı maddesi eklenmiş ancak alınan sonuçlar tatmin edici olmamıştır. İnce katkı malzemesi eklendiğinde kaybın çok olabileceği, kaba katkı eklendiğinde ise topakların ani şekilde cürufla kaplanıp katılaşacağı buna bağlı olarak ortamdan izole olan katkı maddesinin istenilen reaksiyonlara giremeyeceği

gözlenmiştir. Bu girişimlerin ardından Geiseler vd. (1987) çelikhane tozu ile bir enjeksiyon yöntemi geliştirmeyi başarmışlardır. Eriyik cürufa lanslar aracılığı ile oksijenle birlikte silika kumu enjekte edilmiş ve toz olarak kaybın önüne geçilmiştir. Nihai oksidasyon olan FeO (ve bir miktar metalik demir) oksidasyonu ekzotermiktir ve çıkan ısı kumun asimilasyonuna (özümsemesi) yardımcı olur. Sonuç olarak cüruf içeriğinde daha yüksek SiO_2 içeriğine ulaşılırken daha düşük CaO (serbest kireç) içeriğine ulaşılır. Bu uygulamada ise çelik cürufuna katılan FeO ile kaybedilen metal miktarıdır. Demir okside olmamış olsaydı bu sorun manyetik ayırıştırma yoluyla çözülebilirdi.

Bir diğer alternatif yaklaşım ise asimilasyonu kolaylaştıran ve erime noktasını düşüren bir materyal kullanmaktır. Kırık cam parçacıkları bu amaç için uygun bulunmuştur. Belçika’da cam kırıkları boş cüruf potasına konmuş üzerine cüruf dökülmüştür. Alınan sonuçların umut vadettiği belirtilmiştir. Geiseler vd. (1987) sıvı katkı maddelerinin daha iyi karışabileceğinden yola çıkan araştırmacılar yüksek fırın cürufu ve BOF çelik cürufunu aynı potaya dökmeyi denemişler ve ortaya iyi bir ürün çıkarmışlardır. Ancak bu iki materyali uygun miktarlarda bir araya getirilmesi fabrikaların zamanlama ve ulaşım planlaması açısından zorlayıcı bulunmuş ve bu yöntem hayata geçirilememiştir.

Motz ve Geiseler (2001) çelik cürufunun şişme potansiyelinin iyileştirilmesi için sıvı cürufun içeriğindeki serbest kireç miktarını analiz edilip düşük serbest kireç içeriğine sahip olan cüruflarla yüksek serbest kireç içeriğine sahip olan cürufları ayrıştırılmasını önermiştir. Serbest kireç içeriğini belirlemek için etilen glikol metodu ya da istatistiksel kompozisyonu baz alan formüller yöntemi kullanılabilir. Fakat bu yöntem sadece dolomitin eklenmediği düşük MgO içeriği bulunduran çelik cüruflarında kullanılabilir. Almanya’da %4’ün üzerindeki serbest kireç bulunduran çelik cürufları yüksek serbest kireçli çelik cürufu sayılmaktadır.

Çelik cürufunda parçalanma normal zamanlarda istenen bir durum değildir ancak literatürde nadiren de olsa parçalanan cürufların daha az şişme potansiyeline sahip olabileceği düşünülmüştür. Yangquan ve Qizhang (1995) sıcak BOF çelik cüruflarına halen sıcakken su enjekte etmiş ve serbest kirecin hidratasyonu sonucu kırıklar oluşumunu gözlemlemişlerdir. EAF çelik cürufu içeriğinde BOF çelik cürufuna göre daha az serbest CaO bulundurur. Az CaO içeriği sebebiyle EAF çelik cürufunda hidratasyon sonucu yeterince kırık oluşmamıştır. Erimiş cürufa su eklemekten metal konteynırın içine kireç, ıslak kum ve ıslak

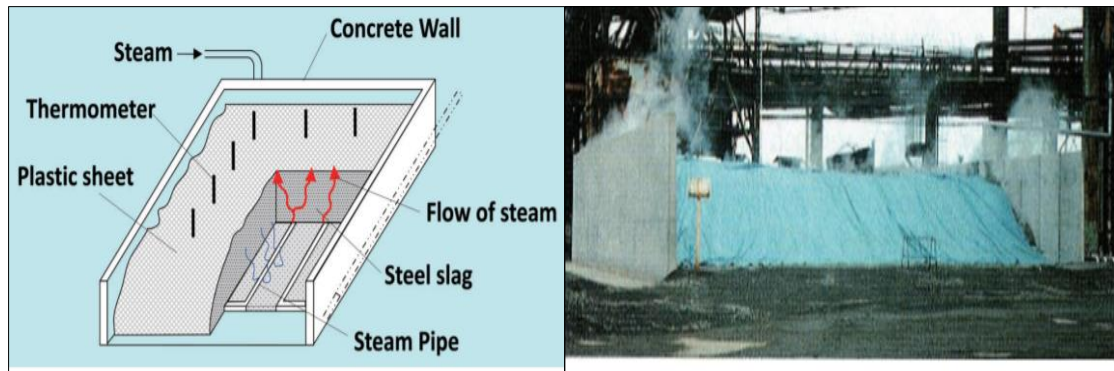
cüruf bulunan bir materyal (%0,5 ile %4 oranında) eklenir. Eklenen kirecin şişme potansiyeline olumsuz bir etki yapmadığı söylenmiş olup uygulama örneği verilmemiştir. Testlerin başarılı olduğu söylenmiş olsa da materyalin yüksek maliyeti uygulamanın yaygınlaşmasının önüne geçmiştir. Ayrıca yazarlar erimiş cürufa su eklenmesinin tehlikeli boyutta sebep olabileceğine ve eklenen kumun ile önüne geçildiğini belirtmişlerdir. Bu yöntem uygulanırken azami dikkat gösterilmesinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Genellikle hızlı soğutulma daha düşük serbest kireç içeriğine sebep olur ve şişme potansiyelini azaltması beklenir. Çelik cürufuna sprej ile su püskürtülmesi içeriğindeki serbest kirecin hidratasyonuna sebep olur. “Instant-chilled steel slag” yöntemi ya da “shallow box chilling” olarak bilinen anlık soğutma işlemi esas olarak dört aşamadan oluşur. İlk aşama erimiş cürufun yaklaşık olarak 100mm’lik tabaka kalınlığı ile açık havada dört dakika bekletilerek sıg plaklar üzerinde soğutulmasıdır. Bu aşamanın ardından çelik cüruflarının üzerine yirmi dakika kadar cüruf sıcaklığı 500°C’ye inene kadar sürekli olarak sprej ile su püskürtülür. İlk su soğutmasından sonra cüruf, cüruf arabalarına yüklenir ve bir diğer su ile soğutma istasyonuna taşınır. Dört dakika daha su püskürtülür ve sıcaklık 200 °C’ye düşürülür. Son aşamada cüruf bir su havuzuna yerleştirilir ve manyetik tarama için yaklaşık olarak 60 °C’ye kadar soğutulur. Dört aşamalı bu işlem 1,5 ila 2,5 saat aralığında tamamlanır. Bu işlem safsızlık oranı düşük ve dane boyutu 20-50 mm aralığındaki F-CaO içeriği %2-4 olan çelik cüruflarına uygulanır. Cüruf katmanlarına su püskürtülmesi patlama riski oluşturur bu durumdan kaçınmak için sıg katmanlar olmasına dikkat edilmelidir. (Montgomery ve Wang, 1991)

Şişme potansiyelini azaltmak için bilinen en yaygın yöntem ise soğumuş çelik cürufunun açık havada neme (yağmur vb.) maruz bırakılarak yaşlandırma işlemidir. Depolandığı bölgenin iklim şartları ve nem oranı yaşlandırma süresini etkiler.

Thomas (1983) yaptığı çalışmada İngiltere menşeli BOF çelik cürufları 500t’dan 3000t’na kadar altı adet yığında depolanmıştır. İçeriğindeki serbest kirecin değişimini gözlemlemek için sürecin başında da numeneler alınmıştır. Hidratasyonunun ilk aylarında tamamlandığını gözlemlemiştir. $CaCO_3$ (kalsiyumkarbonat) ve çimento parçacıkları yığınların üzerinde katılışp örtme eğilimindedir. BOF çelik cürufu için yaşlandırma süreci için çalışmada en az 6 ay boyunca çukurlarda devam eden 3 aydan sonraki süreçte kırma ve eleme işlemleri yapılması önerilir. Sasakı ve Hamazaki (2015) yaptıkları çalışmada 1990ların başında

geliştirilen daha sonra 1992 Aralık ayında tamamlanan buharla yaşlandırma yöntemini tanıtmaktadır. Bu sistemde alttan monte edilmiş olan buhar boruları, üç tarafı betonarme duvarlarla çevrilerek ve üstünü kaplayan ısıya dayanıklı bir levha ile buhar kaybını mümkün olan en düşük seviyede tutmak için tasarlanmıştır. Ayrıca, buharın homojen geçişi çok sayıda döngülü bir boru sistemi ve buhar çıkarma delikleriyle sağlanmıştır. Isıölçerler cürufun üst tabakasına yerleştirilerek cürufun yaşlanma süresi kontrol etmeyi amaçlamaktadır. 6 aydan uzun süren açık havada yaşlandırma yöntemine göre yarım günde çelik cürufunun hazırlanması, bir günde ısının yükseltilmesi, iki gün boyunca buharla yaşlandırma süreci, 2 gün soğuma ve yarım gün tahliye süreciyle birlikte toplamda 6 günde bir döngüyü tamamlayan buharda yaşlandırma yöntemi süreyi oldukça hızlandırmıştır.



Şekil 2.4. Buharla yaşlandırma tesisi (Sasaki ve Hamazaki,2015)

Buharla yaşlandırma uygulanan çelik cürufu numunelerine suya daldırma yöntemi ile şişme testi uygulanmış ve Japon JIS A 5015 standardına göre %1,5 sınır değer olan hacimsel genleşme oranı %0,13'e kadar düşerek tatmin edici değerlere ulaşıldığı görülmüştür.

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde çalışmamızın ana malzemesi olan ve demir-çelik üretiminden katı atık malzeme olarak ortaya çıkan “çelik cürufu” ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir. Çelik cürufunun üretim süreci ve kullanılan yöntemler anlatılacaktır. Üretim sürecinde kullanılan fırınların değişiklik göstermesinden dolayı ortaya çıkan çelik cürufu türleri fiziksel ve kimyasal özellikleri ile açıklanacaktır. Çalışmamızın deneysel kısmında kullanılan ve Zonguldak’ın Ereğli İlçesinde bulunan ERDEMİR Demir Çelik Fabrikasından temin edilen ERDEMİR Çelik Cürufunun özelliklerine değinilecektir.

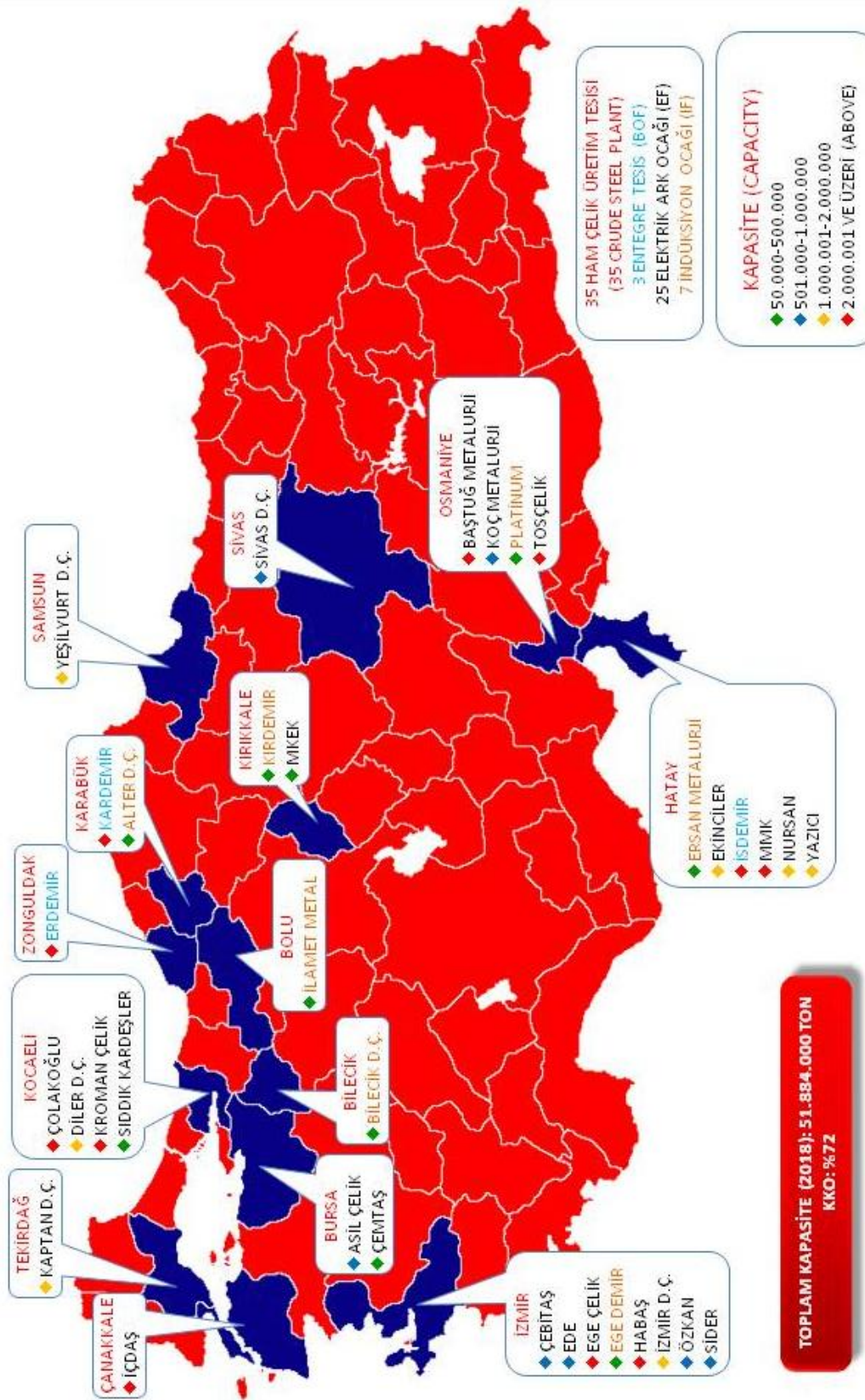
3.1. Çelik Cürufu ve Üretimi

Dünyanın en önemli malzemelerinden biri olan çelik, yapı sektörü, demiryolu, otomotiv gibi hayatımızın her alanında karşımıza çıkar. Çok yönlü, geri dönüştürülebilir ve sağlam bir malzeme olduğundan hayatımızda büyük bir yer edinmiştir. Tarihi çok eskiye dayanmakla birlikte yükselişi 19. yüzyılda Sanayi Devrimi ile Avrupa ve Kuzey Amerika’da başlamıştır. Çelik İhracatçıları Birliği’nden alınan verilere göre 2018’de Türkiye’de yapılan toplam çelik ihracatının değeri 15,6 Milyar Dolar olup yapılan toplam ihracatın %9,3’ünü oluşturmaktadır.

Çizelge 3.1. Dünya ham çelik üretim sıralaması (www.worldsteel.org)

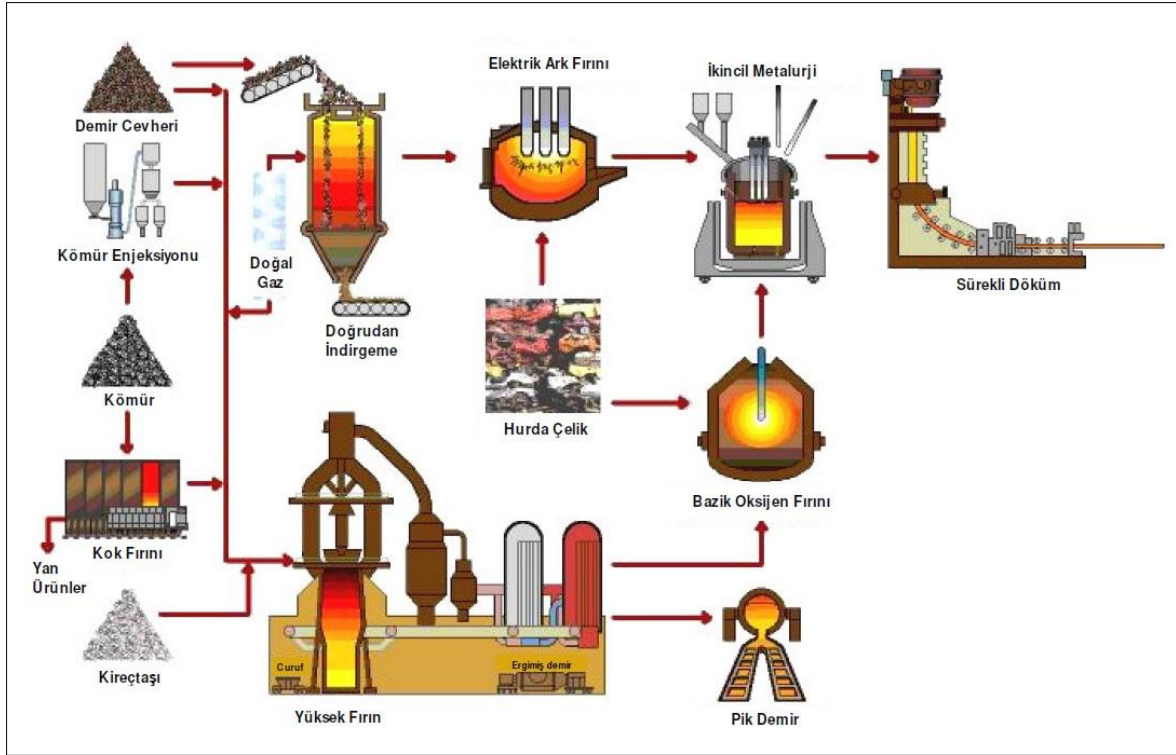
ÜLKE	Sıra	2017		2018
		Tonaj (milyon ton)	Sıra	Tonaj (milyon ton)
ÇİN	1	928,3	1	870,9
HİNDİSTAN	2	106,5	3	101,5
JAPONYA	3	104,3	2	104,7
ABD	4	86,6	4	81,6
GÜNEY KORE	5	72,5	6	71,0
RUSYA	6	71,7	5	71,5
ALMANYA	7	42,4	7	43,3
TÜRKİYE	8	37,3	8	37,5
BREZİLYA	9	34,9	9	34,5
İTALYA	10	24,5	10	24,1

Türkiye’de ilk çelik fabrikası uzun ürün üretimi için KARDEMİR 1937’de açılmıştır. Daha sonra yassı ürün üretimi için açılan ERDEMİR 1965’te, yassı ve uzun ürün üretimi için İSDEMİR 1975 yılında açılmıştır. Özel kuruluşlar 1960 yılı itibariyle elektrik arklı fırınlarda üretime başlamışlardır. Günümüzde Marmara, Ege, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaştığı görülen 25’ü Elektrik Ark Fırınlı, 3’ü Entegre Tesis (Bazık Oksijen Fırınlı) ve 7 tane İndüksiyon Ocaklı olmak üzere 35 adet demir-çelik tesisi bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Türkiye demir-çelik fabrikaları haritası (<http://celik.org.tr/harita/#!>)

Cürufalar, çeşitli metal ekstraksiyonu (özütleme), rafinasyonu ve alaşımlama süreçlerinde ortaya çıkan katı atık ürünlerdir. Kimyasal içeriği, ortaya çıktıkları tesisin kullandığı ürün tipine ve üretim sürecine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Demir-çelik fabrikaları yan ürünlerinden olan çelik cürufu türleri, demir-çelik üretim sürecinde, ergimiş haldeki demirin rafinasyonu sürecinde kullanılan fırın tipine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 3.2. Demir-çelik üretim süreci (Dündar,2006)

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

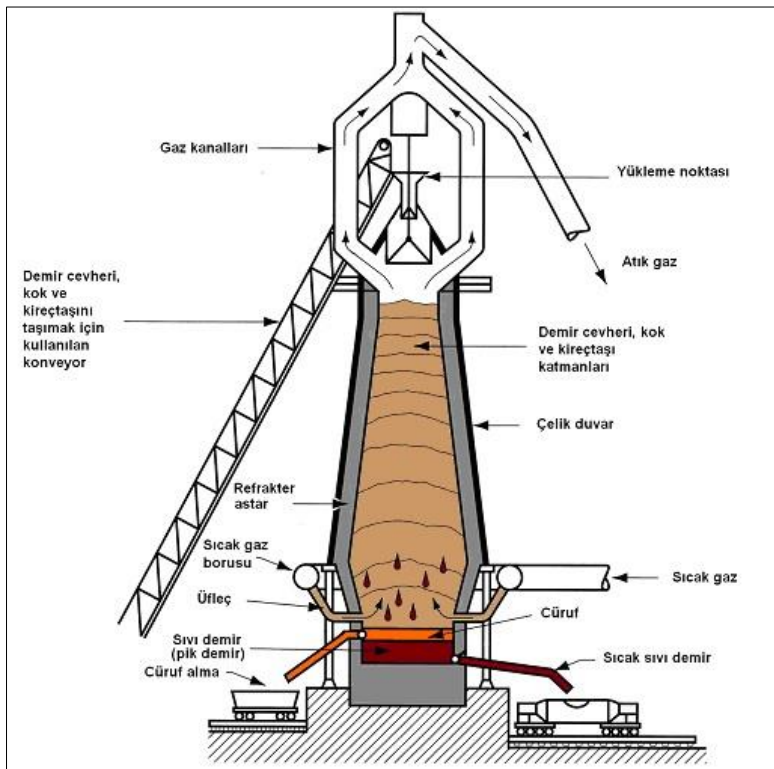
Yüksek fırınlar demir cevherini yüksek ısı ve eritken madde yardımıyla pik demire dönüştürmek için kullanılan bir metalürjik fırın türüdür. Uzun silindirik yapıda içten ateş tuğlası ile dıştan kalın çelik bir kabukla kaplanmıştır. Yüksek fırın tesislerinde malzemeleri fırına yüklemek kolay olsun diye cevher depolama alanları, transfer araçları ve demiryolları bulunmaktadır.

Demir üretim sürecinde demir içeriği yüksek yığın halindeki cevher ve eritken materyal olarak kireç ya da kok kömürü gibi malzemelerle fırın üst noktasından yüklenir. Demir açısından zengin kayadan alınmış demir cevheri çelik üretimi için saflaştırılır. En yaygın olarak bilinen demir cevheri az miktarda Fe_3O_4 (magnetit) ile Fe_2O_3 (hematit) 'tür. Yüksek

fırında demir oksitler kimyasal olarak azaltılır ve sıvı pik demire dönüştürülür. Eritken madde olarak kullanılan kireçtaşı $CaCO_3$ öncelikli olarak demir cevherindeki safsızlıkları cüruf şeklinde uzaklaştırır. (Yıldırım ve Prezzi, 2009) Bir ton demir cevherinden yaklaşık olarak 200-600 kg aralığında yüksek fırın cürufu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.2. Yüksek fırın cürufu kimyasal içeriği (Reuter vd.,2004)

FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	MnO	S
%0,5–0,8	%35–42	%35–40	%8–9	%8–15	%0,3–1.0	%0,7–1,5



Şekil 3.3. Yüksek fırının şematik gösterimi (<http://www.kuark.org/>)

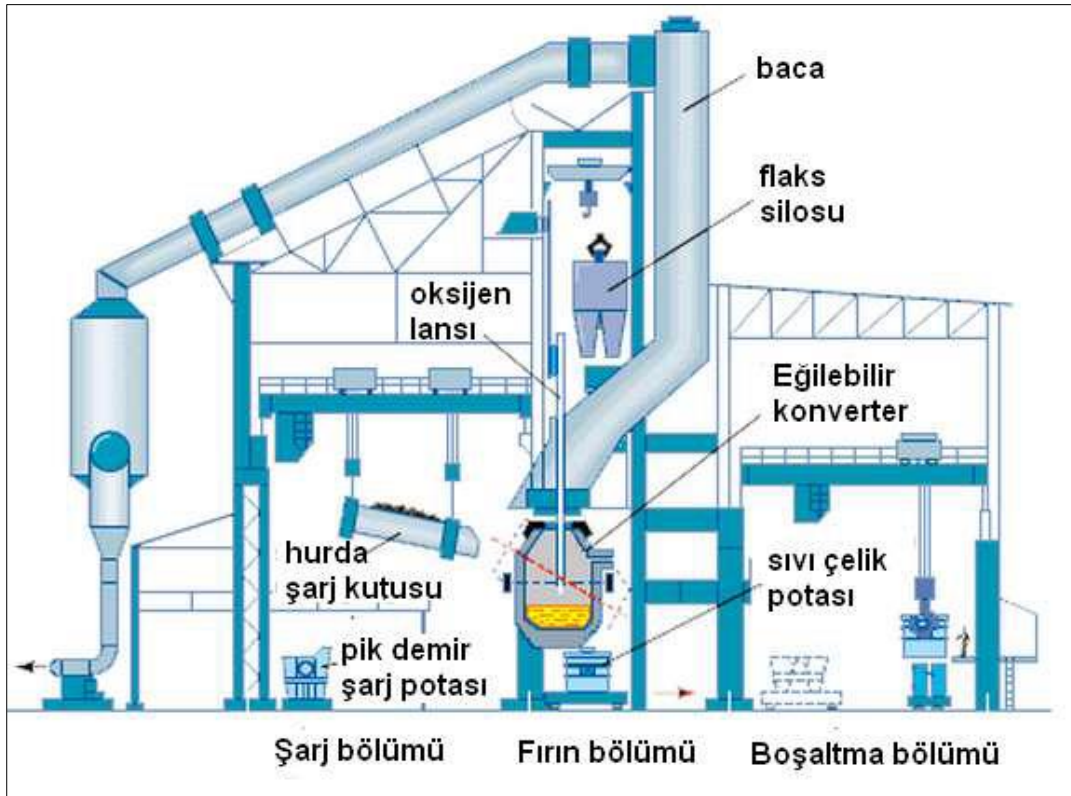
Çıkan cüruf eriyik haldeki pik demirden daha az yoğun olduğu için üstte kalır ve ayrıştırılır. Eriyik pik demir yüksek karbon içeriğine sahip olduğundan (ağırlığının yaklaşık %4-5'i) gevrek ve ticari kullanımlar için elverişsizdir. Bu nedenle pik demir üretimi çelik üretiminin ilk adımını oluşturur.

Yüksek fırın cürufu ve çelik cürufu üretim süreçlerinin benzerliğinden dolayı yapılarının benzer olduğu düşünülmektedir. Fakat yüksek fırın cürufu düşük serbest kireç oranına sahip olması ve camsı tanelerinin yaklaşık olarak 2-5 mm olup agrega olarak kullanıma uygun olmaması ile çelik cürufundan ayrılmaktadır. Kumlama yapılabilir ancak alternatif diğer

materyallere göre pazardaki yeri çok küçüktür. Yüksek fırın cürufu Portland Çimentosu ile birleştiğinde bağlayıcı özelliği olduğundan beton sektöründe katkı maddesi olarak çok önemli bir yer tutmaktadır.

3.1.2. Bazik oksijen fırın çelik cürufu (BOF)

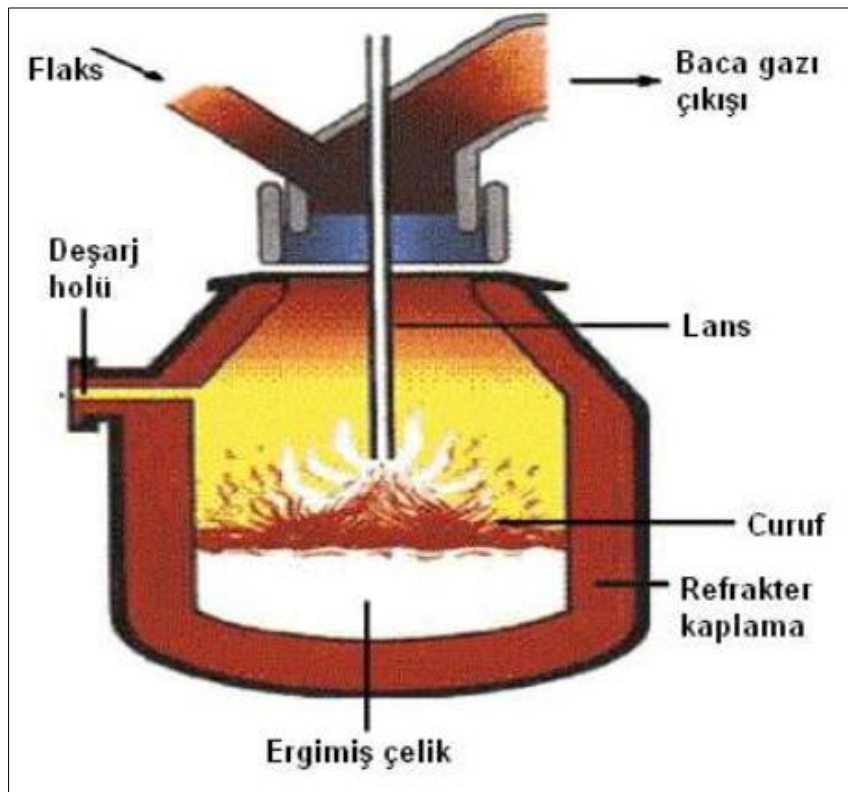
Bazik oksijenli fırın kullanılarak çelik üretim yöntemi (BOF) Linz-Donawitz yöntemi (LD) olarak da bilinir. Erimiş pik demirin dönüştürüldüğü modern çelik üretim yöntemlerinden bir tanesidir. 1948'de Avusturya'nın Linz ve Donawitz kentlerine yakın bir çelik fabrikasında geliştirilmiştir. En yaygın bazik oksijen fırınları armut biçimlidir.



Şekil 3.4. Bazik oksijen fırını ve yardımcı elemanlar (Yıldız,2013)

Yüksek fırınlarda ayrıştırılıp gelen pik demir bazik oksijen fırınına ısı kaybı en az olacak şekilde potalarda taşınır. Yaygın olarak 250 ton kapasiteli bazik oksijen fırınları bulunmaktadır ve etkin kullanım hacmi $290 m^3$ kadardır. Malzemelerin optimum oranlarda karıştırılması ve zamanlamalar bilgisayar destekli yazılımlar sayesinde hesaplanıp gerçekleştirilmektedir. (Yıldız,2013)

Genellikle %70-80 civarında yüksek fırından gelen sıvı pik demir ve ile uygun karbon yüzdesine ve reaksiyonlar için gerekli olan sıcaklığa ($\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$) ulaşmak için hurda çelik karıştırılır. Daha sonra üst kattaki silodan kireç (CaO), fluşpat (CaF_2), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kolemanit ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve tufal (FeO) gibi cüruf yapıcılar eklenir. Gereken döküm sıcaklığına gelindikten sonra Oksijen püskürtülür. Oksijen borusu su soğutmalı olarak çalışmaktadır. Safılık oranı çok yüksek olan Oksijen (yaklaşık olarak %99,5) $10\text{-}12\text{ kg/cm}^2$ basınçla püskürtme lansından çıkarak süpersonik hızda karışıma çarpar.



Şekil 3.5. Bazik oksijen fırını şematik gösterimi

Yaklaşık 20-25 dakikada safsızlıkların cüruf şeklinde atılmasını sağlayacak reaksiyonlar başlar. Bazik oksijen fırındaki reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir.

- $\frac{1}{2}(\text{O}_2)^a = (\text{O})^b$
- $\text{Fe}^b + \frac{1}{2}\text{O}_2^a = (\text{FeO})^c$
- $\text{Si}^b + \text{O}_2^a = \text{SiO}_2^c$

- $Mn^b + 1/2(O_2)^a = MnO^c$
- $2P^b + 5/2(O_2)^a = P_2O_5^c$
- $C^b + 1/2O_2^a = CO$
- $CO + 1/2O_2^a = CO_2$

a: lanstan üflenen oksijen, b: sıvı demire katkı sağlayanlar, c: cürufa katkı sağlayanlar

Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Cr (%)	Fe (%)	MgO (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	SiO_2 (%)	TiO_2 (%)
1-6	30-55	0,1-0,5	14-22	5-15	1-5	0,2-2	0,05-0,15	8-20	0,4-2

Çizelge 3.3. BOF çelik cürufu kimyasal kompozisyonu (Brand ve Roesler, 2015)

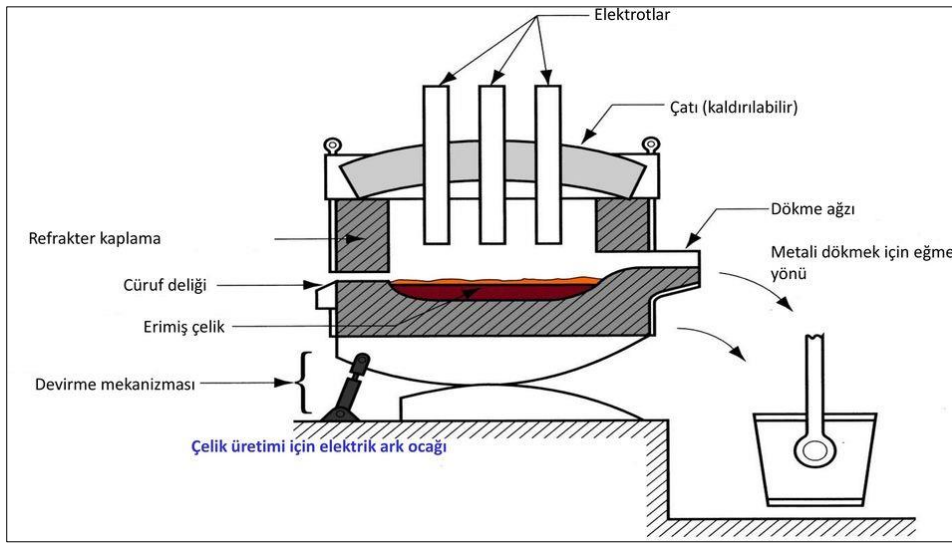
Yaklaşık 20-25 dakika sonra lansa yakın yerden erimiş metal alınarak test edilir ve eğer istenilen içeriğe ulaşılmışsa oksijen borusu fırından çıkartılır. Bazik oksijen fırını çelik cürufu yüksek fırın cürufuna benzer olarak yoğunluk farkından dolayı erimiş çeliğin üzerinde yüzer. Fırın bir yönde eğilerek fırının yanlarında bulunan deliklerden cüruf tasfiye edilir. Üretilen çelik ikincil bir arıtma ünitesinde daha fazla rafine edilmek üzere gönderilebilir.

3.1.3. Elektrik arklı fırın çelik cürufu (EAF)

Çelik üretimde kullanılan ikinci alternatif yol ise çeliğin eritilmesi ve safsızlıklardan arındırılması sürecinde gereken ısıyı bazik oksijenli fırınlardan farklı olarak elektrik enerjisi ile çalışan elektrik ark ocağından sağlanmasıdır. Avrupa Birliği üyelerinden 25 ülkede çelik üretiminin %38'i elektrik ark fırınları ile sağlanmaktadır. Elektrik ark fırınlı tesislerin yatırıma ağırlık verildiğinden 2011 yılında çelik üretimi 4,96 milyon ton artış ile %88'i oranında elektrik ark fırınlı tesislerden sağlanmış ve 25,28 milyon tona ulaşmıştır. (Elektrik ark ocaklı demir çelik tesisleri için MET kılavuzu, 2012)

Elektrik arklı fırın Paul Heroult tarafından Amerika'da 1907 yılında keşfedilmiş ve patenti alınmıştır. Çeşitli eklemeler ve gelişmeler dışında temel çalışma prensibi aynı kalmıştır. İki veya daha fazla elektrotun birinden diğerine geçen elektrik akımının sayesinde hurda metalin

ergimesi için gereken yüksek ısıyı ortaya çıkarması ve kaynağın elektrikle şarj edilmesi mantığına dayanır ve bu nedenle elektrik arklı fırınlar “Heroult” tipi fırın olarak da anılır. Hammadde, enerji ve teknik erişime bağlı olarak hurdaya dayalı metalürjinin gelişimi Dünyanın farklı bölgelerinde değişiklik göstermektedir. Ancak ham çeliğe dayalı metalürjiye yapılan yatırımlara göre çok daha az olduğu görülmektedir. İnşaat sektöründe kullanılan paslanmayan (alaşımlı) yüksek kalite çeliğin üretildiği tesislerdir. Bazı oksijen fırınlarına göre diğer bir farkı ise sıvı pik metal yerine hurda ile şarj edilmesidir.



Şekil 3.6. Elektrik ark ocağı

Hurda metal ve kireçle doldurulan elektrik arklı fırının kapaklarında yer alan elektrotlar indirilir ve geçen elektrik akımı, hurda metal ve elektrotlar arasında ark yaparak hurda metalin ergimesi için gereken yüksek ısıyı ortaya çıkarır. Hurda metaldeki safsızlıkları oksitlenmesi için ortama oksijen salınır. Ortamdaki safsızlıklar oksijen ile reaksiyona girerek Elektrik Ark Ocağı çüruflarını oluşturur. Üretim döngüsü yaklaşık olarak 3 ila 7 saat aralığında tamamlanır ve 300 tona kadar çelik üretimi gerçekleştirilebilir. Üretilen her ton çelikten yaklaşık 155 kg EAF çelik çürufu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.4. Tipik EAF çelik çürufu kimyasal yapısı (Rohde, Ceratti, Nunez, 2003)

	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)
Yükseltgen Rafine	30-35	8-12	15-20	3-9	25-35	3-6	-
İndirgeyici Rafine	45-55	8-12	20-25	3-9	0,5-3,5	0,5-3,5	0,5

Son 30 yılda yapılan araştırmalardan elde edilen çelik cürufunun teknik özellikleri Çizelge 3.5'te görülmektedir.

Çizelge 3.5. BOF, EAF çelik cüruflarının teknik özellikleri (Motz ve Geiseler 2001)

	BOF	EAF	Granit	Çakmaktaşı
Görünür Yoğunluk, g/cm^3	3,3	3,5	2,5	2,6
Uzun-İnce parçalar (%)	<10	<10	<10	<10
Parçalanma Direnci (%)	22	18	12	21
Kırılma Dayanımı	15	13	17	21
Parlaklık	58	61	48	45
Su emme	1	0,7	<0,5	<0,5
Donma-Çözölmeye Karşı Direnç	<0,5	<0,5	<0,5	<1
Bağlayıcı adezyonu (%)	>90	>90	>90	<95

Yapı malzemesi olarak çelik cürufu agregaları doğal agrega olan granit ve çakmaktaşı ile kıyaslandığında doğal agregalara göre daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir. Darbe dayanımı ve kırılma dayanımının doğal agregalara göre belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmekte ve pürüzlü yüzeyle adezyon değerleri ise ağır trafik yükü olan yollarda kullanılmak üzere uygun agregalar olduğunu göstermektedir. Kütle yoğunluğu >3,2'den büyük olan çelik cürufu agregaları hidrolik mühendisliğinde yapı materyali olarak kullanımına uygun olduğunu göstermekte ve Almanya'da her yıl yaklaşık olarak 400 000 ton nehir yataklarında ve setlerinde kullanılmaktadır. (Motz ve Geiseler, 2001)

3.1.4. ERDEMİR çelik cürufu

1965 yılında kurulan ERDEMİR bölgenin en büyük yassı entegre çelik tesisidir. Yaklaşık 4 milyon ton ham çelik üretimi ve 5 milyon ton nihai ürün kapasitesine sahiptir. OYAK Maden ve Metalürji Grubuna üye olan ERDEMİR Dünya standartlarına uygun sıcak ve soğuk haddelenmiş yassı çelik, levha, kalay, krom ve galvaniz kaplamalı sac üretmektedir. 3 tane konvertör (Bazik Oksijen Fırını), 2 tane elektrik ark pota fırını, 1 tane kimyasal ısıtma pota fırını ve 1 tane vakum altında gaz giderme tesisine sahip olan ERDEMİR'de yüksek fırından gelen sıcak metal, kükürt giderme aşamasından sonra çelik üretim sürecinin ilk adımı olan kapasitesi 120 ton olan bazik oksijen fırınlarına ulaşır. Bazik oksijen fırınlarında son beş

yılda yıllık 3,4 milyon ton ila 3,8 milyon ton arasında değişen karbon ve fosfor giderme işlemleri sonucunda sıvı ham çelik üretilmektedir.

Bazik oksijen fırınında sıvı ham çelik, hurda ve cüruf yapıcı maddeler ile fırının içine lans aracılığı ile yüksek basınçlı oksijen ortama verilir. Oksijen safsızlıklarla reaksiyona girmektedir. Sonuç olarak CO gazı ve sıvı oksitler şeklinde ortamdan uzaklaşır. Sıvı oksitler kireç ve dolomit ile cürufu meydana getirir. İşlem bitiminde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100–1500 °C’de cüruf potalarına taşınır ve stok sahalarında soğumaları için bekletilirler. 1 ton çelikten 100–150 kg cüruf elde edilmektedir. ERDEMİR çelik cürufunun yaklaşık özgül ağırlığı 3 gr/cm^3 ’tür ve içeriğinde organik maddeye rastlanmamıştır. Bazik oksijen fırını çelik cürufu oksit ve silikatlardan oluşan bir mineralojiye, metalik olmayan yan ürünler olarak tanımlanabilir. Morfolojik olarak bazik oksijen çelik cürufu koyu gri renk, kübik ve pürüzlü yüzeye sahiptir. Yüksek fırın cürufuna göre sert ve sıkıdırlar. (Erdemir Ar- Ge Raporu ,2005)

BOF çelik cürufunun yüksek CaO/SiO_2 oranı cüruf oluşması için eklenen cüruf yapıcı kireçten kaynaklanır. Cüruf yapıcı ve kazan koruyucu olarak P giderme işlemini %6-8 oranında olumsuz etkilemesine rağmen MgO de eklenir. Yanmış kireç ve dolomit soğutucu etki için eklenir. Sıcak metal içindeki Si oksitlenerek SiO_2 ’de dönüşür. Başlangıçta sıcak metaldeki düşük SiO_2 oranı (%0,2 – 0,3) P giderme işlemi için yeterli olmayabilir ve ekstra SiO_2 eklenir. Bu durum Al_2O_3 oranını arttırabilir ve cüruf yapımına yardımcı olur. Ek olarak soğutucu olarak Fe eklenir ve cüruf içeriğine FeO olarak cürufa katılır cürufun yaklaşık %20’si FeO’ ten oluşmaktadır. Demirin oksitlenerek atılması verimi azaltırken defosforilasyona yardımcı olur. Sıcak metaldeki P oksitlenerek P_2O_5 olarak cürufa katılır. Sıcak metaldeki C, CO gazı olarak ortamdan uzaklaşır. Manganezin büyük bir kısmı oksitlenerek cürufa katılır. Eritken maddeler cürufun viskozitesini ve sıvı metalin ısını düşürürken kirecin özümlemesini kolaylaştır böylelikle defosforilasyon hızlanır. (Juckes,2003)

Çelik cürufunun bu mineralojik yapısı diğer potansiyel agregalara göre daha yoğun olmasını sağlamaktadır. Kütle yoğunluğunun $3,1 - 3,7\text{ gr/cm}^3$ aralığında olması $2,6-2,8\text{ gr/cm}^3$ olan granit ve $2,8-3,1\text{ gr/cm}^3$ olan bazalt ile karşılaştırıldığında ekstra ağır olması kütle ile stabilizasyonu sağlanan uygulamalarda beton agregası olarak kullanılması avantaj sağlar.

Çelik cürufu mineralojisinin Portland çimento klinkeri ile bazı benzer özellikler gösterdiği düşünülmüş ancak yapılan çalışmalarda dayanım testlerinden geçememiştir. (Geiseler,1996) Çelik cürufu içeriğindeki “serbest kireç” ve “serbest MgO” ile içeriğindeki kalsiyum silikatlar da ($C_2S - C_3S$) hidrate olabilen maddeler olup bu çalışmanın amacı olan çelik cürufunun şişme potansiyelindeki ana etkenlerdir.

Çizelge 3.6. ERDEMİR çelik cürufu kimyasal analizi (Karadağ, 2020)

CaO	SiO_2	FeO	MnO	MgO	Al_2O_3	P_2O_5	S	Fe
40-52	10-19	10-40	5-8	5-10	1-3	0,5-1	<0,1	0,5-10

Bu çalışmada, Zonguldak Ereğli’de bulunan ERDEMİR Demir-Çelik Fabrikasından temin edilen BOF türü çelik cürufları kullanılmıştır. BOF-1, BOF-2, BOF-3 numuneleri ERDEMİR cüruf stok sahalarından alınmış 19 mm elek altı numunelerdir. BOF-3, BOF-4, BOF-5, BOF-6 numuneleri ise yeni üretilmiş ve sahada bekletilmemiş numunelerdir. Elenmediği için dane dağılımları çeşitlilik göstermektedir. BOF-7 numunesi ise BOF-1-2-3 ile stok sahasından aynı anda alınmıştır. Doğal su muhtevası konulduğu torbada korunarak 7 ay bekletilmiş daha sonra şişme deneyine tabi tutulmuştur.



Resim 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan BOF numuneleri

3.2. Yapılan Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde Erdemir Demir Çelik Fabrikası atık sahalarından temin edilen BOF türü çelik cürufu numuneleri üzerinde yapılan elek analizi, modifiye proktor ve uzun dönem şişme tayini deneylerinin yapım aşamaları anlatılacaktır. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deney sonuçları grafiklerle sunulacaktır.

3.2.1. Elek Analizi

Çelik cürufu numunelerinin dane çapı dağılımını belirlemek için TS 1900-1 standardı kuru eleme metoduna uygun olarak elek analizleri yapılmıştır. Öncelikle numuneyi temsil edecek kadar numune (yaklaşık 4000 gr kadar) çuvallardan alınıp etüvde $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 'de yirmi dört saat kurutulmuştur. Kuru numune 0,01g doğrulukla tartılmıştır.



Resim 3.2. Etüvde kurutulmuş çelikhane numuneleri

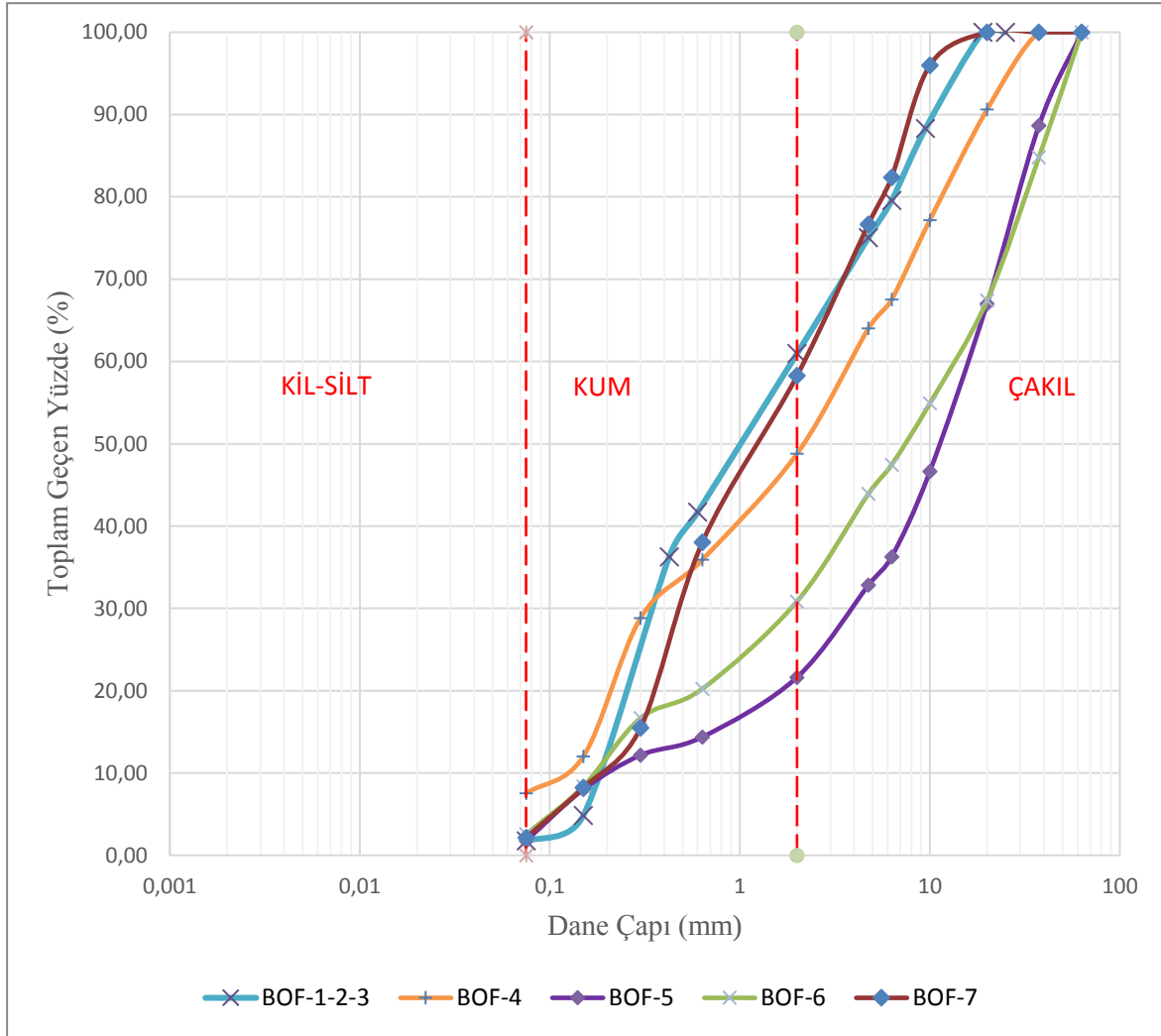
Çizelge 3.7’de görülen elek göz açıklıkları ile elek seti hazırlanmıştır. Eleğin en büyük gözlü eleğine numune yukarıdan dökülmüştür. Danelerin doğru eleklerde kaldığına kanaat getirilene kadar sarsılmıştır. Elek üstünde kalan miktarları tartılmış ve kaydedilmiştir. Toplam numune kütlesi esas alınarak eleklerde kalan malzemenin yüzdesi hesaplanmıştır. Numunelerin dane dağılım grafikleri Şekil 3.7.’de verildiği gibidir

Çizelge 3.7. Hazırlanan elek setinin göz açıklıkları

Elek Göz Açıklığı(mm)
63,000
37,500
20,000
10,000
6,300
4,750
2,000
0,635
0,300
0,150
0,075
Pan



Resim 3.3. Numunelerin elek analizi



Şekil 3.7. BOF numuneleri dane dağılım analizi

Çizelge 3.8. BOF Numuneleri elek analizi sonuçları

mm		BOF-1-2-3	BOF-4	BOF-5	BOF-6	BOF-7
>4,75	Çakıl (%)	39,04	56,83	78,37	69,16	41,73
4,75-2,00	Kum (%)	59,2	41,24	19,85	28,29	56,11
>0,075	Silt-Kil (%)	1,74	1,92	1,77	2,55	2,16

3.2.2. Modifiye proktor deneyi

Çelik cüruf numunelerinin TS 1900-1 standardına göre optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için modifiye proktor deneyi yapılmıştır. İlk adım olarak etüvde $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Literatürde daha önce çalışılmış olan çelik cürufunun optimum su muhtevası %4-8 aralığında olması sebebiyle %4 su muhtevasından başlanarak %18 su muhtevasına kadar çeşitli oranlarda su eklenerek karıştırılmıştır.



Resim 3.4. Kurutulmuş BOF-1 numunesine belirli oranlarda su eklenip karıştırılması

152,4 mm'lik CBR kalıplarında 4,5 kg'lık tokmak kullanarak, 56 darbe ile 3 katmanda düzgün ve sağlam bir yüzey üzerinde sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın yakası dikkatlice çıkartılmış ve numune kalıp yüzeyiyle aynı seviyede olacak şekilde dikkatlice tıraşlanıp, kalıp ve numune ağırlığı tartılmıştır.

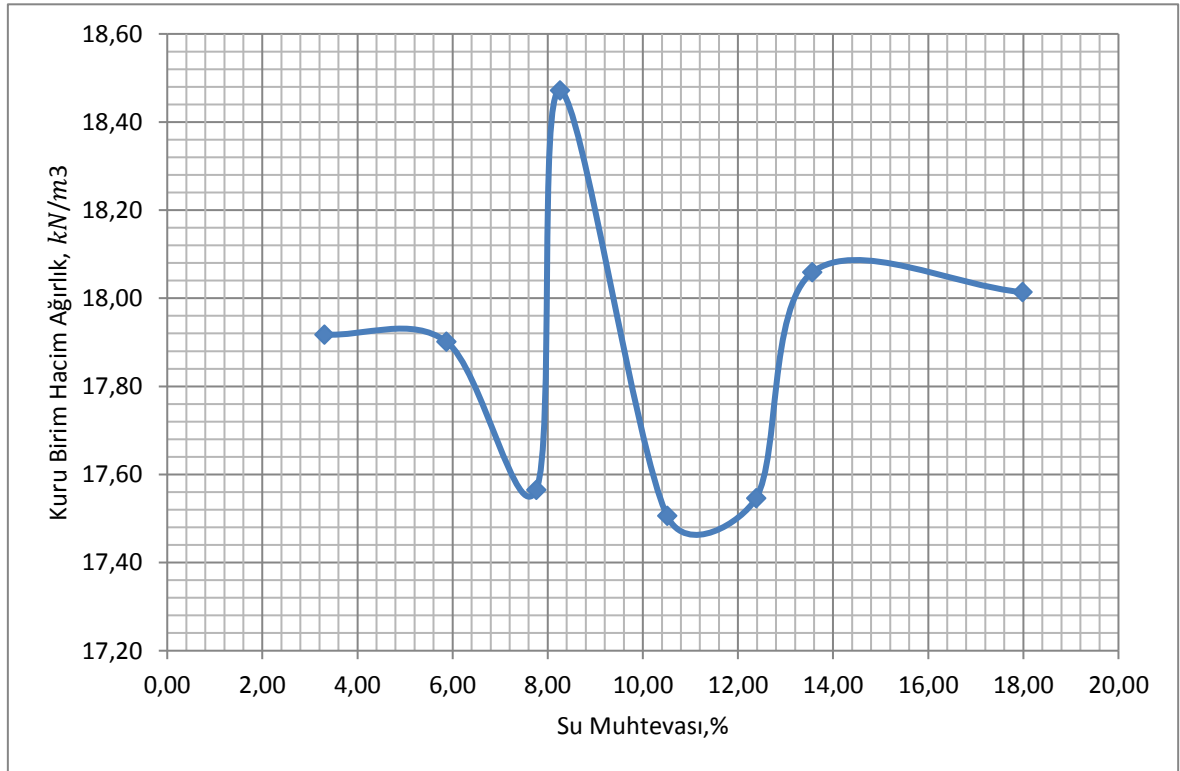


Resim 3.5. Modifiye Proktor deneyi ile optimum su muhtevasının belirlenmesi

Kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 3.8.'de görüldüğü gibidir. Optimum su muhtevasının %8,26 olduğu belirlenmiştir. Fabrikadan temin edildiği dane dağılımına göre kompaksiyon yapılan çelik cürufunun tipik kompaksiyon eğrisine benzemediği ve bir tam bir yarım iki pikli kompaksiyon eğrisi şeklinde davranış sergilediği görülmüştür. Bu şekildeki kompaksiyon literatür araştırmalarında da görülmüştür. Bu durumun muhtemel sebepleri ise sert ve köşeli tanecik yapısı ve heterojen kimyasal yapı olduğu belirtilmiştir. (Rohde vd. 2003, Yıldırım ve Prezzi 2009)

Çizelge 3.9. Kuru birim hacim ağırlık değerleri

	1	2	3	4	5	6	7	8
Kalıp + Sıkıştırılmış Numune (gr)	9880	9930	9800	10030	9890	9970	10260	10300
Kalıp kütlesi (gr)	5730	5910	5730	5730	5730	5730	5910	5730
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (gr)	4150	4020	4070	4300	4160	4240	4350	4570
Su muhtevası (%)	3,30	5,87	7,76	8,26	10,51	12,38	13,56	17,98
Yaş birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	19,30	18,95	18,93	20,00	19,35	19,72	20,51	21,25
Kuru birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	18,68	17,90	17,56	18,47	17,51	17,55	18,06	18,01



Şekil 3.8. BOF-1 Kompaksiyon eğrisi

3.3.3. Uzun dönem şişme testi

ERDEMİR demir-çelik fabrikasından temin edilen taze BOF çelik cüruflarının uzun dönem şişme potansiyellerini belirlemek için TS 1900-2 standardının 5.1.4 Numunenin Suda Bekletilmesi bölümüne göre işlemler yapıldı. Öncelikle çapı 15,2 cm yüksekliği 11,6 cm olan CBR kalıplarında BOF-1, BOF-2, BOF-3 çelik cürufu numuneleri etüvde kurutulmuştur ve yapılan proktor deneyi ile belirlenmiş optimum su muhtevası %8,26 su içeriğine göre 4,5 kg'lık tokmaklarla 56 vuruş yapılarak 3 katman halinde yüksek enerji ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış numunenin alt kapağı delikli olan kapağa filtre kâğıdı konarak değiştirilmiştir. Daha sonra Resim 3.6.'da görüldüğü gibi üst kısma da filtre kâğıdı yerleştirilmiştir.



Resim 3.6. Numunelerin şişme deneyi için hazırlanması

Bilezikler kalıplara monte edilmiş ve dikey deformasyonu ölçmek için kullanılacak ayarlanabilir sapı olan delikli kapak yerleştirilmiştir. Numunelerin bir boyutlu dikey şişmesi, kadranlı göstergeler aracılığıyla ölçülmüştür. Kadranlı göstergeler tripod kullanılarak numunelerin üzerine yerleştirilmiştir. Kadranlı deformasyon ölçerler, üzerine yerleştirilmiş delikli plakaların ayarlanabilir sapına dokunacak şekilde ayarlanarak göstergeler sıfırlanmıştır.



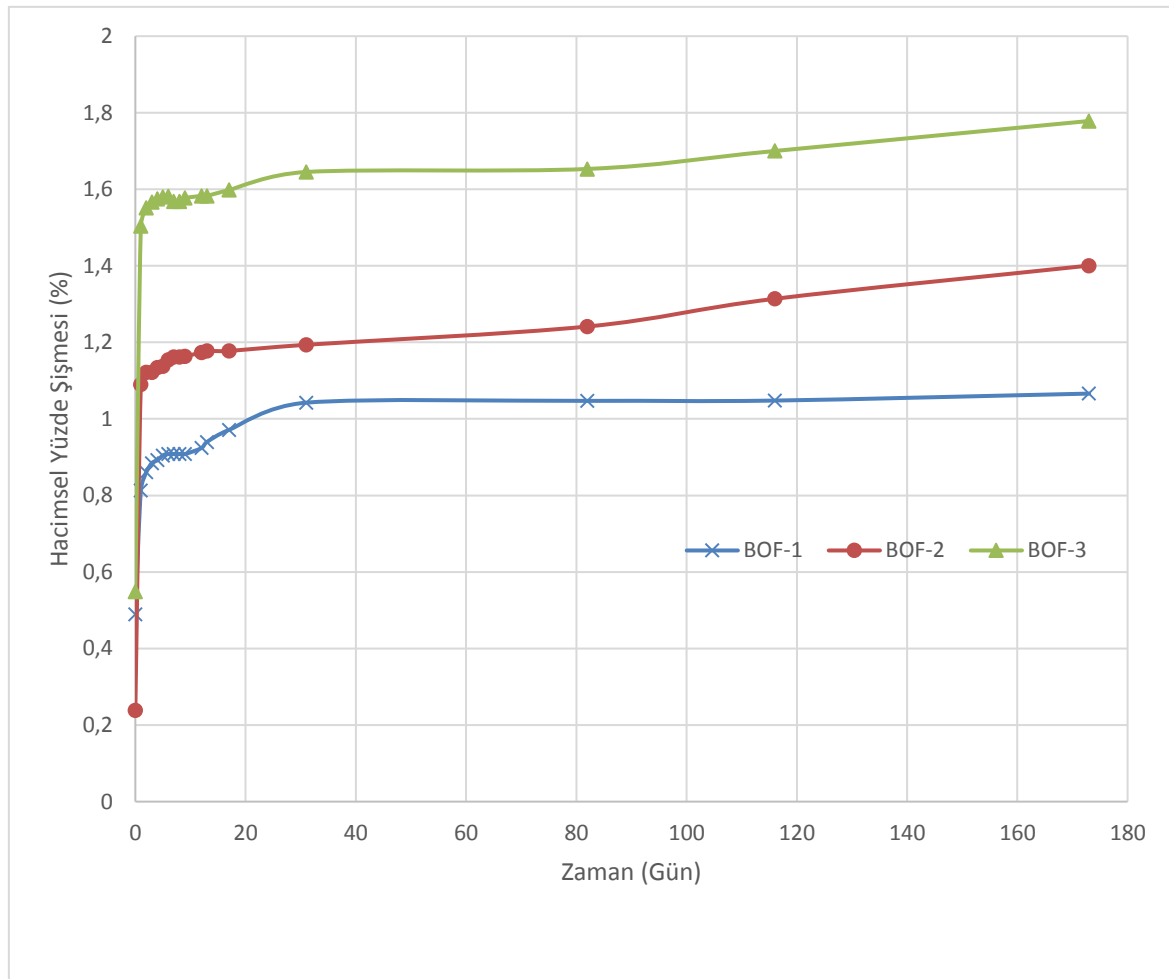
Resim 3.7. Numune şişme tayini düzeneği

Numune hazırlama işlemleri tamamlandıktan sonra kalıpları içi oda sıcaklığındaki çeşme suyu dolu su tankına yerleştirilmiştir. Kalıplarının tamamen suya batırılmasından hemen sonra ilk değerler göstergelerden okunmuştur ve 30 dakika sonra bir okuma daha alınmıştır. İlk ıslanma gününden sonra her 24 saatte bir okuma alınmıştır. Çelik cüruf numunelerinin şişmesi 173 gün boyunca izlenmiştir.



Resim 3.8. Uzun dönem şişme potansiyeli deney düzeneği

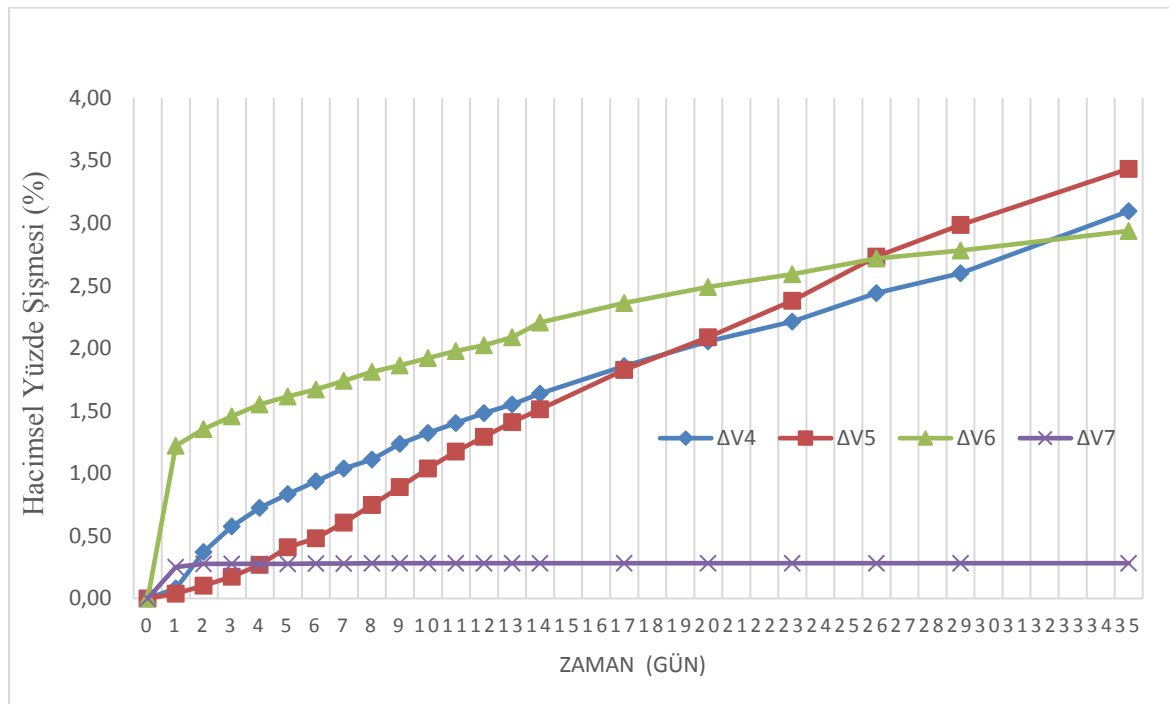
Şekil 3.9’da görüldüğü gibi BOF-1, BOF-2, BOF-3 numuneleri sırasıyla %1,07, %1,40, %1,78 şişme gösterdiği ölçülmüştür. Modifiye proktor deneyi ile elde edilen grafikte optimum su muhtevasının düzensiz bir eğri oluşturması ve uygulamada yüksek enerjili sıkıştırma planlanmış olsa da tam olarak sağlanamayarak daha az sıkıştırılması durumuna karşılık BOF-4, BOF-5, BOF-6 taze numunelerinin ve 7 ay açık havada yaşlandırılmış ve BOF-7 numuneleri doğal su muhtevalarında (sırasıyla %9,08, %7,51, %4,13, %13,20) ve standart enerji ile (2,5 kg’lık tokmaklarla 3 katmanda olmak üzere 56 vuruşla) sıkıştırılmış ve şişmesi izlenmiştir.



Şekil 3.9. BOF-1, BOF-2, BOF-3 uzun dönem şişme grafiği

Çizelge 3.10. BOF-4, BOF-5, BOF-6, BOF-7 için şişme deneyi sonuçları

Gün	4 (mm)	5 (mm)	6 (mm)	7 (mm)	$\Delta V4(\%)$	$\Delta V5(\%)$	$\Delta V6(\%)$	$\Delta V7(\%)$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,100	0,050	1,550	0,320	0,079	0,039	1,220	0,252
2	0,470	0,130	1,720	0,350	0,370	0,102	1,354	0,276
3	0,730	0,220	1,850	0,350	0,575	0,173	1,457	0,276
4	0,920	0,340	1,970	0,350	0,724	0,268	1,551	0,276
5	1,060	0,520	2,050	0,352	0,835	0,409	1,614	0,277
6	1,190	0,610	2,120	0,353	0,937	0,480	1,669	0,278
7	1,320	0,770	2,210	0,354	1,039	0,606	1,740	0,279
8	1,410	0,950	2,300	0,356	1,110	0,748	1,811	0,280
9	1,570	1,130	2,365	0,358	1,236	0,890	1,862	0,282
10	1,680	1,320	2,440	0,358	1,323	1,039	1,921	0,282
11	1,780	1,490	2,510	0,358	1,402	1,173	1,976	0,282
12	1,880	1,640	2,570	0,358	1,480	1,291	2,024	0,282
13	1,970	1,790	2,650	0,358	1,551	1,409	2,087	0,282
14	2,080	1,920	2,800	0,358	1,638	1,512	2,205	0,282
17	2,360	2,320	3,000	0,358	1,858	1,827	2,362	0,282
20	2,610	2,650	3,160	0,358	2,055	2,087	2,488	0,282
23	2,810	3,020	3,290	0,358	2,213	2,378	2,591	0,282
26	3,100	3,470	3,450	0,358	2,441	2,732	2,717	0,282
29	3,300	3,790	3,530	0,358	2,598	2,984	2,780	0,282
35	3,930	4,360	3,730	0,358	3,094	3,433	2,937	0,282



Şekil 3.10. BOF-4, BOF-5, BOF-6 BOF-7 uzun dönem şişme grafiği

BOF-4, BOF-5, BOF-6 ve BOF-7 numunelerinde 36 gün boyunca gözlemlendiğinde sırasıyla %3,09, %3,43, %2,94 ve 0,28 şişme ölçülmüştür. Şekil 3.10'daki şişme grafiği incelendiğinde BOF-4, BOF-5, BOF-6 numunelerinin şişmesinin hızının yavaşladığı ancak henüz tamamlanmadığı görülmektedir. Yaşlandırılmış BOF-7 numunesinin 3 günün sonunda şişmesinin bittiği ve en az şişmeyi gösterdiği gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde artan çevresel bilinç ile geri dönüşüm ve sıfır atık kavramları her geçen gün önem kazanmaktadır. Ortaya çıkan atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tanınarak kullanım alanı bulması ise bilimsel çalışmalarla olmaktadır. Demir-çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelik cürufları granüler yapısı ve doğal agrega ile benzer teknik özellikler göstermesi ile inşaat sektöründe geniş kullanım alanı bulabileceğinin göstergesidir. Yol yapımında kullanılan doğal agrega miktarının fazla olması yüksek maliyetli olmakla birlikte alternatif malzeme kullanılması doğal kaynakların tüketimini de azaltır. Çelik cürufunun yol yapımında agrega yerine kullanılması günümüzde yapılan çalışmalarla kendine yer bulmaya başlamıştır. Bu çalışmada çelik cürufunun yol altyapısında kullanılması durumunda şişme potansiyelinin uygunluğu sorgulanmıştır.

Yol altyapısı; Karayolları Teknik Şartnamesinde “Yolun üst yapısı altında kalan kısımdır.” şeklinde tanımlanmıştır. Ilıcalı (1988) ise “Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilmiş toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak, kazı işleminden sonra istenilen düzlüğü ve eşit yük dağılımını sağlamak amacıyla döşenen ve sıkıştırılan toprak da yarma kesimindeki altyapıya dahildir.” olarak açıklamıştır. İstenilen kotta düzgün yüzey sağlayarak üstyapı tarafından aktarılan yükleri zemine ileterek taşınmasını sağlamak ve yolu don ve diğer su etkilerine karşı korumak yol altyapısında olması beklenen özelliklerdir. Yol altyapısında taşıma gücü düşük, şişme potansiyeli yüksek ve don gibi su etkilerine karşı zayıf zeminlerin kullanılmaması önerilmez. Bu sebeple istenilen özellikleri sağlamayan bir zemin ile karşılaşıldığında yerine uygun malzeme serilerek yol altyapısı oluşturulur. Karayolları teknik şartnamesinde dona hassas olmayan taban malzemelerinin özellikleri Çizelge 4.1’deki değerleri sağlaması istenmiştir.

Çizelge 4.1. KTŞ Dona Hassas Olmayan taban malzemelerinin özellikleri

Deney	Şartname Limiti
0,075 Elekten Geçen %	≤ 12
Hacimsel Yüzde Şişmesi	$\leq \%3$

BOF çelik cüruf numunelerine yapılan elek analizi sonuçlarına göre 0,075mm elekten geçen malzeme %12'den küçük olması beklenmektedir. Yapılan elek analizlerinde çelik cürufu şartname sınır değerini sağlamaktadır. Yol altyapısında dolgu olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 4.2. Elek analizi sonucu 0,075 mm elekte kalan malzeme yüzdesi

	BOF-1-2-3	BOF-4	BOF-5	BOF-6	BOF-7
0,075mm (%)	1,74	7,54	1,77	2,55	2,16

Karayolları teknik şartnamesinde “Yaş CBR deneyi sonucunda %3 ve daha yüksek oranda şişme veren malzemeler dolgu ve üstyapı tabanında kullanılamayacaktır.” ifadesi ile şişme sınır değeri belirtilmiştir. Yapılan çalışmada ERDEMİR Demir-Çelik Fabrikasından temin edilen taze ve yaşlandırılmış BOF numuneleri üzerinde yapılan deneyler ile;

Yüksek enerjide optimum su muhtevasında sıkıştırılmış ERDEMİR stok sahalarından temin edilmiş çelik cüruf numuneleri olan BOF-1 BOF-2 ve BOF-3 173 gün şişme değerlerinin gözlemlenmesi sonucunda sırasıyla %1,07, %1,40, %1,78 şişme gösterdiği,

Standart enerjide doğal su muhtevalarında sıkıştırılmış BOF-4 BOF-5 BOF-6 taze çelik cürufu numunelerinin şişme değerlerinin 36 gün gözlenmesiyle sırasıyla %3,09, %3,43, %2,94 şişme gösterdiği ancak şişmenin yavaşlamış olsa bile devam ettiği ve Karayolları Teknik Şartnamesi sınır değerini aştığı,

Laboratuvar şartlarında doğal su muhtevası korunarak 7 ay bekletilmiş BOF-7 numunesinin %0,28 şişme gösterdiği ve şişmesinin durduğu,

Sonuçlar değerlendirildiğinde ise taze çelik cürufu numunelerinin uygulamalarda kullanılmadan önce şişme potansiyelini açık havada yaşlandırma yöntemi ya da diğer alternatif yaşlandırma yöntemleri kullanılarak iyileştirdikten sonra yol altyapısında kullanılmasının uygun olduğu,

Stok sahalarında iklim şartlarına göre yeterli sürede açık havada neme maruz bırakılarak bekletilen çelik cürufu numunelerinin ise şişme potansiyelinin yol altyapısında kullanımına uygun olduğu, sonuçlarına ulaşılmıştır.

Demir-elik üretiminden ortaya çıkan büyük miktardaki elik cürufu göz önüne alındığında elik cürufunun alternatif agrega olarak kullanılması, yapım maliyetlerini düşürmesinin yanı sıra atık doğal kaynakların tüketimini azaltacaktır. Yaşam alanlarını kaplayan katık atık depolama sahaları azalacak ve tesislerin atık gider maliyetleri gelire dönüşecektir. Bu nedenle katı atıkların geri dönüşümü çevremiz açısından büyük önem kazanmaktadır. Demir-elik fabrikalarının yoğunlukta olduğu bölgelerde yapılan yolların agregalarının taş ocakları yerine cüruflardan karşılanması maliyeti düşürüp ekonomiye katkı sağlayacaktır. Bu nedenle yol yapımı ile ilgilenen kuruluşlara sempozyumlar düzenleyerek teşvik edilmesi geri dönüşüm oranını arttıracaktır.

Karayolları Genel Müdürlüğü gibi yol yapımında yetkili kurumların şartnamelerinde atık malzemelerin geri dönüşümü ile ilgili yaptırımları arttırmasıyla atık malzemelerin kullanımı artacaktır. elik cürufunun yolda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar birleştirilerek malzemenin iyi tanınması projelerin sağlıklı şekilde yürütülmesi açısından standart oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Andreas, H., Herrmann, I., L dstr m-Larsson, M., Lagerkvist, A. (2005). *Physical properties of steel slag to be reused in a landfill cover*. Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy
- Brand, A. S., Roesler, J. R., (2015). Steel Furnace Slag Aggregate Expansion and Hardened Concrete Properties. *Cement & Concrete Composites*, 60, 1–9.
-  a lar, G. A. (2007). *Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
-  evre ve Şehircilik Bakanlığı, (2012). *Elektrik Ark Ocaklı Demir  elik Tesisleri için MET Kılavuzu*, Ankara.
- Chen, S., Lin, D., Luo, H., Lin, Z., (2017). Application of Reclaimed Basic Oxygen Furnace Slag Asphalt Pavement in Road Base Aggregate. *Construction and Building Materials* 157, 647–653.
- Christopher, A.S., Saturday, E.W., Oladeji, B.G., Biodun, O.O., (2014). Process Modeling of Steel refining in Electric Arc Furnace (EAF) for Optimum Performance and Waste Reduction. *Chemical and Process Engineering Research*, 18.
- Crawford, C. B., Burn, K. N. (1969). Building Damage from Expansive Steel Slag Backfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95.
- D ndar, H. (2006). *Farklı Soğutma Hızlarında So utulan  elikhane Cüruflarının    tme Parametrelerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Erdemir, (2005), AR-GE Raporu  elik üretim cüruflarının asfalt üretiminde kullanılması. Zonguldak.
- Fırat, S., Yılmaz, G., Vural, İ., Khatib, J., Umu, S., U. (2015).  elikhane Cürufu ile Yol Altyapı Dolgusunun Zemin  zelliklerinin İyileştirilmesi, Ejoir, Aralık 2015 Iwcea  zel Sayısı Cilt 1.
- Geiseler, J., Steffes, B., Fix, W., & Koch, K. (1987). Absenikung Der Freikalkgehalte Von Ld-Schlacken Im Fluessigen Zustand. *Stahl Und Eisen*, 107(9), 403–409.
- Geiseler, J. (1996). Use of Steelworks Slag in Europe, *Waste Management*. 16, 59-63
- Günay, E., Kara, M., Erdemir  elikhane Cüruflarının Ekonomik Ve Ekolojik Değerlendirilmesi, T B TAK MAM, Malzeme Enstitüsü.
- Hasan bio lu,  . (2014), *Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agrega Olarak Karayolu İnşaatı Dolgu ve Granüler Tabakalarında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Ilıcalı, M. (1988). *Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Juckes, L. M. (2003). The Volume Stability of Modern Steelmaking Slags, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 112:3, 177-197.
- Kara, M. (2014). *Sürekli Tavlama Yöntemi İle Yeni Kalite Bir Emaye Çeliği Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karadağ, H., Fırat, S., Işık, N.S. (2020). Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması, *Politeknik Dergisi* (baskıda).
- KGM, (2013). "yol alt yapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler", Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ), Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lee, P., Y., Suedkamp, R. J. (1972). Characteristics Of Irregularly Shaped Compaction Curves Of Soils, *Highway Research Record*, 381, 1-9.
- Montgomery, D.G., Wang, G. (1991). Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete-Strength Related Properties, *Department of Civil and Mining Engineering University of Wollongong Wollongong, NSW, Australia*.
- Motz, H., Geiseler, J. (2001). Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources, *Waste Management*, 21, 285-293.
- Pasetto, M., Baldo, N. (2010). Experimental Evaluation of High-Performance Base Course and Road Base Asphalt Concrete with Electric Arc Furnace Steel Slags, *Journal of Hazardous Materials*, 181, 938–948.
- Pasetto, M., Baldo, N., (2010). Recycling of Steel Slags in Road Foundations, *Environmental Engineering and Management Journal*, (2010) 9.
- Ramachandran, V.S., Serad, P.J., Feldman, R.F. (1964). Mechanism of Hydration of Calcium Oxide, *Nature*, 201, 288-299.
- Reuter, M., Xiao, Y., Boin, U. (2004). *Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes, VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- Rohde, L., Núñez, W.P., Ceratti, J.A.P, (2003). Electric Arc Furnace Steel Slag Base Material for Low-Volume Roads, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1819, 201-207.
- Sasaki, T., Hamazaki, T., (2015), Development of Steam-aging Process for Steel Slag, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 109*, Slag Aggregates, 9th European Slag Conference Metz, France.

- Soyonar E., Fırat S., Yılmaz G., Okur V., (2018). *Performance of Steel Slag and Fly Ash Added Soil as Subbase Materials*, Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham.
- The British Standards Institution (2009). BS EN 1744-1 Tests For Chemical Properties of Aggregates, London, England
- Tanabe, H., Nakada, M., (2003), *Steelmaking Technologies Contributing to Steel Industries*, NKK Technical Review, (2003) 88.
- Thomas, G.H., (1983), Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction, *Commission of the European Communities technical steel research final report*.
- Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (2015), Demir Çelik Cüruf Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Türk Standartları Enstitüsü, (2006), TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü, (2006), TS 1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.
- Uppot, J.O., (1984). Structural Fill of Steel Slag Caused Heave of a Building, *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 55.
- Wang, G., (2010), Determination of The Expansion Force of Coarse Steel Slag Aggregate, *Construction and Building Materials*, 24, 1961–1966.
- Wang, G., Wang, Y., Gao, Z., (2010), Use of Steel Slag as a Granular Material: Volume Expansion Prediction and Usability Criteria, *Journal of Hazardous Materials*, 184 (2010), 555–560.
- World Steel Association, (2012), *The White Book of Steel*, Brussels, Belgium
- Yıldırım, İ.Z., Prezzi, M., (2009). Use of Steel Slag in Subgrade Applications, *Joint Transportation Research Program, FHWA/IN/JTRP-2009/32 Final Report*, Purdue University, Indiana, ABD
- Yıldız, K. (2013), Demir-Çelik Metalurjisi, Sakarya Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, 59.
- Yzenas, J., Cook, K., (2017), Cost Effective Secondary Road Reclamation Utilizing Steel, 9th European Slag Conference, Metz-France
- Zumrawi, M.M.E., Babikir, A.A.A., (2017). Laboratory Study of Steel Slag Used in Stabilizing Expansive Soil, *Asian Engineering Review*, 4(1), 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CENGİZ, Tuğba
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 29.08.1989, Kars
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : tubacengzmail.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2012
Lise	Fethiye Kemal Mumcu Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2014	Kayhan Mühendislik	Statik Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Fırat, S., Cengiz, T. (2019). Çelik Cürufunun Geri Kazanımı, *IMASES III Uluslararası Multidisiplinler Akademik Çalışmalar Sempozyumu Bildiri Özetleri Kitabı*,95

Hobiler

Kitap okumak, bisiklete binmek, yüzmek, doğa yürüyüşü yapmak



GAZİ GELECEKTİR..