

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA AGREGA OLARAK KULLANILMASINA İLİŞKİN İNCELEME VE ÖNERİLER

Fatih YONAR¹ Attila DİKBAŞ² Ahmet SAĞLIK³ Muhammet KOMUT⁴

ÖZET

Gelişmiş pek çok ülkede olduğu gibi, Türkiye’de de, kaynakların ve doğal alanların tüketimini azaltabilmek ayrıca çevresel etkileri indirgeyebilmek bağlamında, konuyla ilgili farklı seçeneklerin değerlendirmeye alınması gerekmektedir. Çok sayıda araştırma ve uygulama, seçenekler arasında yer alan “Cürufun Karayolu İnşaatında Agregada Olarak Kullanımı”nı öne çıkarmaktadır.

2015 yılı istatistiklerine göre ülkemiz, toplamda 50,3 milyon ton ham çelik üretim kapasitesi ile dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır. Bu doğrultuda; çalışma kapsamında EAO’ların bulunduğu bölgelerden birer tesis seçilerek, bu 3 tesisten EAO çelikhane cüruf numunesi alınmıştır. Alınan numuneler Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında bağlayıcı tabakalara ilişkin temel deneyler dahilinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler çalışma sonunda sunulmuştur.

GİRİŞ

Türkiye 50,3 milyon ton üretim kapasitesi ile dünyanın en büyük 8. çelik üreticisidir. Bu kapasite iki farklı üretim biçimiyle elde edilmektedir. Bu üretim biçimlerinden entegre çevrimde, demir cevheri ana ham madde olarak kullanılmaktadır. Elektrik çevriminde ise hurda metal ham madde olarak kullanılmaktadır (Fontini, 2009). Ülkemizdeki mevcut kapasitenin % 77’si elektrik ark ocaklarına (EAO) aittir (SGM, 2013).

Hali hazırda Türkiye’de 28 tesis faaliyet göstermektedir. Bu tesislerin 8 tanesi Akdeniz Bölgesi’nde, 8’i Marmara Bölgesi’nde, 7’si Ege Bölgesi’nde, 3’ü Karadeniz Bölgesi’nde ve 2’si İç Anadolu Bölgesi’nde bulunmaktadır. Bu tesislerin 3’ü entegre, 2’si indüksiyon ocağı ve kalan 23 tesis EAO’dur.

EAO’da üretilen her ton çelikte 120 ila 150 kg arasında çelikhane cürufu elde edilmektedir (Dikbaş, 2011). EAO tesislerinin mevcut kapasitesine göre tam üretimde yıllık 2,8 milyon ton çelikhane cürufunun elde edilmesi mümkündür. EAO çelikhane cürufunun uluslararası literatürde yan ürün olarak kabul edilmesine ve yapay agrega olarak özellikle karayolu inşaatında kullanılmaktadır.

1. Dr., İTÜ Teknokent, TechnoBee Akademik Firması, İstanbul

2. Prof. Dr., Medipol Üniversitesi, Güzel Sanatlar Tasarım ve Mim. Fak.

3. İnş. Yük. Müh., Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı, Ankara

4. İnş. Müh., Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı, Ankara

Ülkemizde ise Mayıs 2017’de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından “Çelikhane Cürufunun Karayolu İnşaatında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması” (KGM ARGE 2012-7) projesi kapsamında granüler tabakalarda kullanımı için özel teknik şartname hazırlanarak yürürlüğe konulmuştur. Söz konusu özel teknik şartnamede tüm granüler tabakalarda kullanılacak çelikhane cürufunun kontaminasyona mahal vermemek adına nonplastik olması istenmiş, su absorpsiyonu limitleri, cürufun gözenekli yapısı nedeniyle 1 puan yukarı çekilmiş ve standart deneylere ek olarak potansiyel genleşme deneyi limitleri ile tanımlanmıştır. Tanımlanan bu deneyler haricindeki deneylerin limitleri, doğal agrega ile aynı tutulmuştur. Çelikhane cürufunun granüler tabakalarda kullanımına ek olarak uluslararası örneklerde olduğu gibi karayolu inşaatında bitümlü sıcak karışımlarda da kullanımının sağlanması çevre, ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda Türkiye’de hızlanan altyapı çalışmaları ile mineral agregaya olan ihtiyaç da artmıştır. Mineral agrega tüketiminin artması ile de doğal kaynakların hızlı tüketimi, taş ocaklarından meydana gelen kirliliklerin artması ve doğal alanların tüketimi gibi çevresel etkiler söz konusu olmaktadır. Bu sebeple EAO çelikhane cürufunun ulaştırma yapılarında kullanımı iyi bir alternatif olarak görülmektedir (Pasetto & Baldo, 2010). Bu malzemenin kullanımı ile mineral agrega tüketimin azaltılması, çevresel etkinin indirgenmesi ve katı atık miktarının azaltılması sağlanabilecektir (Pasetto & Baldo, 2010).

Bu çalışma kapsamında üç farklı bölgedeki çelik üreticilerinden üç EAO çelikhane cürufu numunesi ve karşılaştırma yapılabilmesi için Ömerli-Alyans Taşocağı’ndan mineral agrega numunesi alınmıştır. İlk olarak alınan numunelerin kimyasal içerikleri incelenmiş, çalışmanın devamında karayolu inşaatında bağlayıcı tabakalarda yapay agrega olarak kullanımına ilişkin temel deneyler yapılmış ve sonuçlar Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca değerlendirilmiştir. EAO çelikhane cürufunun çevresel etkileri irdelenmiş, son olarak bütün bu değerlendirmelere ilişkin sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

MALZEME VE METOT

Bu çalışma iki ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde numunelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenmiş, fiziksel özellikler Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde ise EAO çelikhane cürufunun çevresel etkisi irdelenmiştir.

Malzeme

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de üç farklı bölgedeki üreticilerden üç numune alınmıştır. Numune miktarı 360 kg olarak belirlenmiştir. Birinci numune C1 olarak isimlendirilmiş, Marmara Bölgesi’ndeki bir üreticiden temin edilmiştir. İkinci numune C2 olarak isimlendirilmiş, Akdeniz Bölgesi’ndeki bir üreticiden temin edilmiştir. Üçüncü numune C3 olarak isimlendirilmiş, Ege Bölgesi’ndeki bir üreticiden temin edilmiştir. Mineral agrega numunesi MA olarak isimlendirilmiş ve daha önce de belirtildiği gibi Ömerli-Alyans Taşocağı’ndan temin edilmiştir.

C1 numunesi, manyetik ayrıştırma işleminden geçirilmiştir. C2 numunesi, yaşlandırma işleminden geçirilmiştir. C3 numunesi ise herhangi bir işlem görmemiştir.

Tesislerde, cüruf su püskürtülerek soğutulmaktadır. Bu nedenle cürufun çok gözenekli yapıda olduğu gözlemlenmiştir.

Mineral agreganın ve EAO çelikhane cüruf numunelerinin kimyasal içerikleri, XRD ve kimyasal analiz ile belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin kimyasal içerikleri

Numune Kodu	C1	C2	C3	MA
Metalik Fe	0,48	0,56	6,68	0,24
Toplam Fe	20,02	23,14	26,92	0,78
FeO	19,54	22,58	20,24	0,54
SiO ₂	12,86	18,62	19,73	0,92
Al ₂ O ₃	7,84	7,77	6,52	0,42
Toplam CaO	19,78	18,91	16,20	32,5
Serbest CaO	5,80	0,21	0,27	0,17
MgO	9,36	3,43	4,79	22,05
MnO	4,58	3,06	4,92	0,05

Tablo 1’de de görüldüğü üzere, tüm parametreler her numune için uygulanan işlemler nedeniyle farklılık arz etmektedir. İşlemlerden kaynaklanan bu farklılıkların yanı sıra EAO çelikhane cürufu için uygulamada dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler serbest CaO ve MgO içerikleridir. Bu parametreler hidratasyonları sırasında potansiyel genleşmeye neden olmaktadır dolayısıyla EAO cürufunun karayolu inşaatında kullanımı için CaO ve MgO içerikleri kritik kimyasal parametreler konumundadır.

Fiziksel Özellikler

İlk olarak numunelere ASTM C127-12 ve ASTM C128-12 su absorpsiyonu ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçların ortalaması Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu değerleri

Numune Kodu	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Su Absorpsiyonu (%)
C1	3,618	1,99
C2	3,590	3,58
C3	3,720	5,51
MA	2,850	0,31

Tablo 2’de görüldüğü üzere EAO çelikhane cürufu su absorpsiyonu değerleri mineral agreganın hayli üzerindedir. Bu durum cürufun gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Sıvı cürufun su püskürtülerek soğutulması sırasındaki yüksek sıcaklık farkı, cüruf içerisinde bulunan gazların uzaklaşmadan içeride hapsolmesine

neden olmaktadır. Bu gazların oluşturduğu odacıklar da gözenekli yapının asıl sebebidir.

Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu değerlerinin daha detaylı bir şekilde incelenebilmesi için C1 numunesinin her fraksiyon için analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: C1 numunesi birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu değerleri

Fraksiyon	Zahiri Özgül Ağırlık	Hacim Özgül Ağırlık-Kuru	Su Absorpsiyonu (%)
25-19	3,746	3,369	2,99
19-12,5	3,717	3,358	2,87
12,5-9,5	3,667	3,379	2,32
9,5-4,75	3,792	3,547	1,82
4,75-2	3,588	3,397	1,57
2-0,425	3,678	3,483	1,53
0,425-0,180	3,532	3,355	1,49
0,180-0,075	3,401	3,256	1,31
Filler	3,442	-	-

Tablo 3'te görüldüğü üzere, tane boyutu küçüldükçe birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu değerleri düşmektedir. Birim hacim ağırlık değerlerindeki düşüşün nedeninin demir içeriğinin iri tanelerde yoğunlaşmasından kaynaklandığı, su absorpsiyonundaki düşüşün ise ince tanelerin daha az gözenekli yapı sergilemesinden kaynaklandığı kanaatine varılmıştır.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; bitümlü temel ve binder için % 2,5, aşınma tabakası ve taş mastik asfalt için % 2 su absorpsiyonu limitleri verilmiştir. Tablo 2'de verilen deney sonuçlarına göre C2 ve C3'ün su absorpsiyonu değerleri şartnamede belirtilen limitlerin üzerindedir. Bununla birlikte şartnamede; özel durumlarda, diğer koşulları sağlamak kaydıyla, yüksek su absorpsiyonuna sahip agreganın idarenin onayı ile kullanılabilceği belirtilmiştir (KGM, 2013).

Dikkate alınması gereken bir diğer husus da cürufun birim hacim ağırlık değerlerinin yüksek olmasıdır. Bu durum cürufun ekonomik taşıma mesafesini kısaltacağı ve ağırlıkça karışıma katılacak bağlayıcı miktarını arttıracığı düşünülmektedir.

Tablo 1 ve 2 karşılaştırıldığında ise birim hacim ağırlık değerlerinin metalik Fe'den ziyade toplam Fe içeriği ile bağıntılı olduğu görülmektedir.

Numunelere BS 812 standardı kapsamında yassılık indeksi deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo.4 Yassılık indeksi deney sonuçları

Numune Kodu	Yassı Tane Oranı (%)
C1	8,00
C2	5,93
C3	4,59
MA	17,68

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; bitümlü temel ve binder için % 30, aşınma tabakası ve taş mastik asfalt için % 25 yassılık indeksi limitleri verilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü üzere numuneler şartnamede belirtilen limitleri sağlamaktadırlar. Bununla birlikte cüruf numunelerine ait değerlerin mineral agregaya oranla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Cürufun gözenekli bir yapıya sahip olmasına neden olan su püskürtme ile ani soğutma işlemi, tanelerin daha küresel ve kübik formda parçalanmalarını desteklemektedir. Bu durumda da çelikhane cürufunun yassılık indeksi, doğal agregalara oranla çok daha düşük olmaktadır. Düşük yassılık indeksi, cürufun pürüzlü ve gözenekli yüzeyi nedeniyle düşük olan işlenebilirliğini dengelemek yönünde çalışmaktadır (Yonar, 2017).

Numunelere ASTM D4318 standardı uyarınca plastik limit deneyi yapılmıştır. Numunelerin nonplastik olduğu tahmin edilmektedir. Fakat kil, silt vb. malzeme kontaminasyonunun netleştirilebilmesi için ilgili deneyler uygulanmıştır. Sonuç olarak numunelerin kontamine olmadığı ve nonplastik olduğu belirlenmiştir.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; bitümlü temel, binder, aşınma ve taş mastik asfalt tabakaları için malzemenin non-plastik olması gerektiği şartı verilmiştir. Numuneler şartnamede belirtilen limitleri sağlamaktadır.

Numunelere ASTM C142 standardı uyarınca kil toprakları ve dağılabilen tane oranı deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo.5 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deney sonuçları

Numune Kodu	Dağılan Tane Oranı (%)
C1	0,20
C2	0,41
C3	0,33
MA	0,58

Atterberg limitleri deneyi kapsamında; çelikhane cürufu ve doğal agrega içerisinde kil, silt vb. malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu deneyin yapılmasındaki asıl amaç; özellikle cüruf içerisinde bulunan serbest CaO ve MgO bileşenlerinin 24 saatlik koşullandırma sürecinde su ile etkileşimi sonucu dağılan tane oranının belirlenmesidir.

KTŞ 2013'te bitümlü temel, binder ve aşınma tabakası agregasında % 0,3 oranında dağılabilen tane kabul edilmektedir. TMA tabakasında ise dağılabilen tanelerin bulunmaması istenmektedir (KGM, 2013).

Doğal agregada dağılabilen tane oranı cüruftan yüksek bulunmuştur. Bu durum, doğal agrega taneleri üzerine yapışmış fillerden kaynaklanmaktadır. Atterberg limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlar ışığında doğal agreganın tüm üstyapı tabakalarında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Çelikhane cürufun numunelerinde dağılabilen tane oranları, % 0,20, % 0,33 ve % 0,41 olarak belirlenmiştir. KTŞ 2013 uyarınca; TMA tabakasında dağılabilen tanelere sahip agregaların kullanılamayacağı, % 0,3'ten az dağılabilen tane oranına sahip agregaların ise bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarında kullanılabileceği belirtilmiştir. Fakat cüruf numunelerinde elde edilen dağılabilen tane oranları; serbest CaO'nun hidrate olmasından kaynaklanmakta, yaşlandırma işlemi ile bu oran düşürülebilmektedir. Buna ek olarak sönmüş kireç, soyulma önleyici katkı maddesi

olarak BSK'larda kullanılmaktadır. Bu nedenlerle çelikhane cürufu içindeki dağılabilen tanelerin, malzemenin bitümlü sıcak karışımlarda kullanımına engel teşkil etmediği kararına varılmıştır (Yonar, 2017).

Numunelere ASTM C131 standardı uyarınca parçalanma direnci deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo.6 Parçalanma direnci tayini deney sonuçları

Numune Kodu	Aşınma Oranı (%)
C1	24,95
C2	18,85
C3	23,94
MA	18,75

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; bitümlü temel ve binder için % 30, aşınma tabakası için % 27 ve taş mastik asfalt için % 25 parçalanma direnci limitleri verilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü üzere numuneler şartnamede belirtilen limitleri sağlamaktadırlar.

Tablo 6 incelendiğinde, doğal agreganın parçalanmaya karşı direncinin cüruftan yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, gözenekli cüruf tanelerinin daha narin davranmasından kaynaklanmaktadır (Yonar, 2017).

Numunelere ASTM C88 standardı uyarınca hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi MgSO₄ çözeltisi ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; bitümlü temel ve binder için % 18, aşınma tabakası için % 16 ve taş mastik asfalt için % 14 hava tesirlerine karşı dayanıklılık limitleri verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü üzere numuneler şartnamede belirtilen limitleri sağlamaktadırlar.

Çelikhane cürufunun poroz yapıya sahip olmasına karşın donma çözünmeden aşırı etkilenmediği görülmektedir. Bu durum; cürufun mukavemetinin doğal agregaya oranla yüksek olması fakat ani soğutma sırasında oluşan gözenekler nedeniyle daha narin bir yapı göstermesi olarak açıklanabilir (Yonar, 2017).

Tablo 7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları

Numune Kodu	Don Kaybı (%)
C1	1,88
C2	3,00
C3	1,87
MA	1,50

Numunelere Nicholson metodu uyarınca soyulma mukavemeti deneyi yapılmıştır. Her numune için DOP katkısız ve % 0,2 SCG-XL DOP katkılı iki deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 8'de sunulmuştur.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'de tüm bağlayıcı tabakalar için soyulma mukavemeti limiti % 60 olarak verilmiştir. Bitüme DOP katkısı ilave edilmeden yapılan soyulma mukavemeti deney sonuçlarının C2 ve C3 numunelerinde yetersiz kaldığı Tablo 8'de görülmektedir. % 0,2 DOP katkısı ile de bu numuneler KTŞ 2013'te verilen % 80 limitini sağlayamamaktadırlar.

Tablo.8 Soyulma mukavemeti deney sonuçları

Numune Kodu	Soyulma Mukavemeti DOP'suz (%)	Soyulma Mukavemeti DOP'lu (%)
C1	60-70	90-100
C2	40-50	60-70
C3	30-40	60-70
MA	60-70	80-90

Yüksek metalik demir içeriğine sahip cüruf numunelerinin soyulma mukavemetlerinin düşük olduğu yapılan farklı deneylerde gözlemlenmiştir. C1 numunesinin nispeten düşük metalik demir içeriği (% 0,48), soyulma mukavemetinin istenen düzeyde kalmasını sağlamıştır. Buna ek olarak yaşlandırılmış cüruf içinde bulunan Ca(OH)_2 soyulma önleyici bir katkı maddesi olarak BSK'larda kullanılmaktadır (Yonar, 2017).

Numunelere ASTM D3319 standardı uyarınca cilalanma deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo.9 Cilalanma deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sürtünme Değeri (British Pendulum)
C1	58,2
C2	59,0
C3	66,9
MA	53,4

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; binder tabakası için 35, aşınma ve taş mastik asfalt tabakası için 50 cilalanma değeri limitleri verilmiştir. Tablo 9'da görüldüğü üzere numuneler şartnamede belirtilen limitleri sağlamaktadırlar. Ayrıca cüruf numunelerinin cilalanma değerlerinin mineral agregaya oranla yüksek olduğu görülmektedir. Cürufun yol üstyapısında aşınma ve TMA tabakalarında kullanımı durumunda sürtünme katsayısı daha yüksek, dolayısıyla daha güvenli yolların inşaatına olanak sağlayacağı açıktır (Yonar, 2017).

Çevresel Etki

Türkiye'de cüruflarla ilgili özel bir çevre mevzuatı bulunmadığından, diğer atıklarda olduğu gibi Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik ile Düzenli Depolama Yönetmeliği bu konuda öne çıkmaktadır.

Çelik üretiminde kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen oksitlerden gaz halinde olanlar, potadan uzaklaşarak gaz toplama tanklarında toplanmaktadır. Sıvı halde olanlar ise, ilave edilen katkı malzemeleri ile birleşerek cürufu oluşturmaktadır. Cüruf, çelik üretimi esnasında çelik içerisindeki empürütelerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu kompleks bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan ürün olarak özetlenebilmektedir. Cürufun yaklaşık yarısı kireç (CaO) olup, geri kalanı sıcak metal ve hurdadaki elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir. Ancak bu

bileşenlerin büyük çoğunluğu diğer metal oksitler ile stabil ve kararlı bileşikler oluşturarak çevresel açıdan stabil yapıya bürünmektedir.

Cüruf genel olarak tehlikesiz atıktır ve inert atıklar sınıfına girmektedir. Fiziksel olarak koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptir. Yapılan çok sayıda araştırma belirli bir süre bekletilmiş cürufların çevresel toksisiteye neden olacak nitelikte kimyasal bir bileşen içermediğini göstermektedir.

Cürufların hammadde olarak yeniden kullanımı sayesinde bir yandan normal koşullarda stok sahalarında bekletilen ve büyük kütleler halinde ortaya çıkan bir malzeme sağlıklı biçimde uzaklaştırılmış olmakta, diğer yandan doğal kaynak tüketiminden tasarruf sağlanmakta ve çevre sorunları minimuma indirilmektedir.

Cüruf atıkları, 05.07.2008 tarih ve 26927 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren, Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik çerçevesinde “Tehlikesiz Atık” olarak nitelendirilmiştir (AYGEİY, 2008). Demir-Çelik sektöründen kaynaklanan temel cüruflar, elektrikli ark fırınlarında meydana gelen fırın cürufu ve pota cüruflarıdır. Söz konusu cüruflar; Yönetmelikte 100202 atık koduyla belirtilen işlenmemiş cüruflar ve 100201 kodlu cüruf işleme atıklarıdır. Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik Çerçevesinde Demir-Çelik sektöründen meydana gelen diğer atıklar ile gösterilmektedir ve tehlikesiz atık kategorisindedir.

Tehlikesiz ve inert atıkları ilgilendiren en genel mevzuat 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik’tir. Bu yönetmelik çerçevesinde yapılan tanımlamalar şu şekildedir (ADDDY, 2010):

İnert Atık: Fiziksel, kimyasal veya biyolojik olarak önemli derecede herhangi bir değişime uğramayan, çözünmeyen, yanmayan, fiziksel veya kimyasal olarak reaksiyona girmeyen, biyolojik bozunmaya uğramayan veya temas ettiği maddeleri çevreye veya insan hayatına zarar verecek şekilde etkilemeyen ve toplam sızıntı kabiliyeti ve ekotoksisitesi önemsiz miktarda olan, özellikle yüzeysel su ve yeraltı suyu kirliliği tehlikesi yaratmayan atıklar.

Tehlikesiz Atık: Tehlikeli atık tanımına girmeyen atıklardır. Demir-çelik endüstrisinden meydana gelen işlenmemiş cüruflar tehlikesiz ve/veya inert atık olarak değerlendirilmektedir.

17.06.2011 tarih ve 27967 sayılı Resmi Gazete ile yürürlüğe giren Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanmıştır. Bu bağlamda halihazırda tehlikesiz ve inert atıklarla ilgili önemli mevzuatlardan birisi söz konusu tebliğdir (BTAGKT, 2011). Tebliğin Ek-2 listesinde; tebliğin kapsamında olmayan atık kodları sunulmuştur. Bu atık kodları arasında İşlenmemiş Cüruf (100202) atık kodu yer almamaktadır. Dolayısıyla EAO üretiminden kaynaklanan cüruflar söz konusu tebliğ kapsamında yer almaktadır.

EAO cüruflarının, doğal agrega ile karşılaştırıldığında, yeterli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip oldukları, ayrıca çevresel olarak uyumlu ve kimyasal olarak uygun özellikte oldukları görülmüştür (Pasetto & Baldo, 2011). Cüruflar inert yan ürün sınıfında yer aldıkları için diğer çelik üretimi atıklarından ayrı olarak biriktirilmeleri ve depolanmaları gerekmektedir. Bu husus ülkemizde de T. C. Çevre ve Orman Bakanlığı 26 Kasım 2007 Tarih ve B.18.0.ÇYG.0.04.02.-199.03/19363 sayılı yazısında da cürufun atık olmadığına dair resmi yazıyla da teyit edilmiş bulunmaktadır.

Cürufun yeniden kullanımı, sağlıklı biçimde uzaklaştırılmasını sağlamakta ve kullanıldığı alanda doğal kaynakların hammadde olarak tüketilmesini azaltmaktadır. Bu

yönleriyle cürufların yeniden kullanımı çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır. Ancak cürufların kullanılacağı alana bağlı olarak çevreye olabilecek etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu alanda yapılan bazı çalışmalar aşağıda aktarılmıştır. Amerikan Ulusal Cüruf Birliği (NSA) tarafından çelikhane cüruflarının yeniden kullanımından kaynaklanabilecek riskler kötü durum senaryosu yaklaşımıyla hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda çelikhane cüruflarının anılan biçimlerde kullanımının halk ve çevre sağlığı açısından anlamlı bir risk içermediği bildirilmiştir (NSA, 1998).

Bu çalışmayla ilgili temel sonuçlar şu şekildedir:

Cüruf içeriğindeki metallerin sıvı ortama verdikleri bileşikler önemsiz düzeylerde kaldığı için yeraltı ve yüzeysel içme suyu kaynakları için tehlike oluşturmamaktadır (NSA, 1998).

Çelikhane cürufunun hayvanlar ve fauna üzerinde belirli bir etkisi bulunmamaktadır. Cüruf içeriğindeki metaller besin zincirinde birikmemektedir (NSA, 1998).

Çelikhane cürufları, nehirler ve göller gibi su ortamlarının kalitelerine ve sucul yaşama olumsuz etkisi olmadığından buralarda güvenle kullanılabilir. Ancak hacimce küçük su ortamlarında yeterli seyrelme sağlanamama ihtimaline karşı pH, alüminyum ve baryum konsantrasyonları izlenmelidir (NSA, 1998).

Cüruflar dolgu malzemesi olarak kullanıldıktan sonra suyla temas halinde bazı durumlarda yeşil veya sarı sızıntı suyu oluşumuna neden olabilmektedirler. Oksitlenmeden kaynaklanan bu durum genellikle yüksek fırın cüruflarının kullanımında gündeme gelmekle birlikte oksitlenme birkaç gün içinde sona ermektedir. Ayrıca bu durum havayla yeterince temas etmemiş taze ve ince tanecikli cüruflarda ortaya çıkmaktadır. Buna önlem olarak taze cürufların açık havada yeterince nötralize olmasının sağlanması ve kullanıldığı ortamlarda gerekli drenaj koşullarının sağlanması gerekmektedir (ASA, 2002).

Newcastle Üniversitesi tarafından cürufların stabilize yollarda kullanımıyla ilgili yapılan bir araştırmada cüruf uygulamasından sonra bazı durumlarda sülfür kokusu olduğu, ayrıca sızıntı suyunda da sülfür kokusu oluşabildiği belirtilmiştir. Ancak bunun geçici bir durum olduğu gözlenmiştir. Yeterince havalandırılmış cüruflarda sülfür kokusu sorununun oluşmadığı tespit edilmiştir (ASA, 2002).

EAO cüruflarının karayolu inşaatında agrega olarak kullanımındaki olası çevresel etkileri konusunda yapılan laboratuvar çalışmaları bulunmaktadır. Bu doğrultuda özellikle cürufun çevreye olan zehirlilik etkisini ölçmek üzere ekotoksisite analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçlarına göre EAO cürufları tehlikesiz yan ürün kategorisinde değerlendirilmektedir (Sofilic, Mladenovic, & Sofilic, 2010).

Bu çalışma kapsamında söz konusu numuneler Katı Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2 kapsamında yine aynı yönetmelikte tanımlanan tüm parametreler ışığında incelenmiştir. C1 numunesinin toplam çözünmüş madde ve nikel konsantrasyonları nedeniyle, C2 numunesinin toplam çözünmüş madde ve florür konsantrasyonları nedeniyle, C3 numunesinin ise benzen, toluen, etil benzen ve ksilenin incelendiği BTEX parametresi nedeniyle durağan atık kategorisine giremediği fakat her üç numunenin de tehlikesiz atık sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Çelikhane cürufunun inşaat uygulamalarında kullanılabilmesi için bünyesinde bulunan ve genleşmeye neden olan serbest CaO ve MgO bileşiklerinin hidrate edilmesi bir başka deyişle yaşlandırılması gerekmektedir. Bu işlem esnasında hidrate olmuş CaO

büyük oranda cürufun bünyesinden uzaklaşmaktadır (Yonar, 2017).

Temin edilen çelikhane cürufunun herhangi bir yaşlandırma işleminden geçirilmediği kabul edilmiştir. Bu nedenle hidrate olmamış serbest CaO bileşeninin çözünmüş madde miktarını etkilediği kanaatine varılmıştır (Yonar, 2017).

Üç numune için inert atık limitlerini aşan parametreler nikel, florür ve BTEX'dir. Cüruf içinden süzülen bu metal ve bileşenler çevre için ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Cürufun yaşlandırma işlemi esnasında, ilk aşamada CaO ve MgO hidrate olarak Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 'ye dönüşmektedir. Yaşlandırma işleminin yeterince uzun tutulması durumunda ise CO_2 'nin etkisi ile Ca(OH)_2 , CaCO_3 'e ve Mg(OH)_2 de MgCO_3 'e dönüşmektedir. Bileşenlerin bu evrilme sırasına göre su ile etkileşimleri her tepkime ile azalmaktadır. CaO ve MgO su ile tepkimeye girerken, Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 su ile tepkimeye girmeyen fakat 25 °C sıcaklıkta su içindeki çözünürlükleri sırası ile 1,73 g/L ve 0,000064 g/L olan bileşiklerdir. Bir sonraki aşamada oluşan CaCO_3 'ün çözünürlüğü 0,013 g/L, MgCO_3 'ün ise 0,00106 g/L'dir. Karbonatların meydana geldiği üçüncü aşamada cüruf tanelerinin etrafında çözünürlüğü çok düşük bir tabaka oluşmaktadır (Exponent, 2007). Bu tabaka, metallerin ve bileşenlerin cüruf içinden süzülme hızını yavaşlatmakta ve zaman içinde oluşumunu devam ettirmektedir. Bu doğrultuda cüruf ne kadar uzun süreyle yaşlandırılırsa, uygulamada metallerin, bileşenlerin ve Ca(OH)_2 'nin süzülme miktarı o kadar düşmektedir (Fronek, 2011). Dolayısıyla cürufun yaşlandırılması çevresel açıdan da bir koşuldur (Yonar, 2017).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EAO çelikhane cürufunun uluslararası literatürde yan ürün olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde granüler tabakalarda yapay agrega olarak kullanılmakla birlikte potansiyeli olan böyle bir yan ürünün bitümlü sıcak karışımlarda kullanım yolunun da açılması, cürufun kullanımını destekleyecektir. Bu çalışma kapsamında cürufun temel kimyasal, fiziksel ve çevresel özellikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar ve sonuçlara ilişkin öneriler aşağıda sunulmuştur.

EAO çelikhane cürufunun su absorpsiyonu değerleri mineral agregaya oranla oldukça yüksektir. Bu durum cürufun gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Gözenekli yapı, içsel sürtünmeyi arttırmakta ve bağlayıcı tabakalarda daha yüksek stabilite elde edilmesini sağlamaktadır. Fakat bitümlü sıcak karışımlarda, bağlayıcı oranını artırması beklenmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken bir diğer durum da tane boyutunun küçülmesi ile su absorpsiyonu değerlerinin düşmesidir. Tasarımlarında Aşınma Tip-3 ve TMA Tip-2 gibi ince taneli karışımların kullanılmasının ekonomik olacağı düşünülmektedir.

EAO çelikhane cürufunun birim hacim ağırlığının yüksek olması, karışıma ağırlıkça katılacak olan bağlayıcı miktarını arttırmaktadır. Karışımındaki bağlayıcı miktarının artmasının, maliyetleri ve ayrıca performans sonuçlarını etkileyeceği düşünülmektedir. Dolayısıyla çelikhane cürufunun ekonomik olarak kullanılabilmesi için metalik demirin ayrıştırılarak birim hacim ağırlığın düşürülmesi gerekmektedir.

EAO çelikhane cürufunun yassılık indeksi değerleri mineral agregaya oranla daha iyidir. Bu durum, ani soğutma esnasında cüruf tanelerinin kübik ve küresel biçimde parçalanmasından kaynaklanmaktadır.

Numuneler içerisinde kile rastlanmamasına karşın cüruftaki CaO ve MgO içerikleri dağılılabilen tane oranının limitler üzerinde çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumun cürufun yeterli yaşlandırmaya maruz bırakılması ile aşılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca genleşme durumunun ortadan kaldırılabilmesi için yaşlandırma işlemi bir zorunluluktur.

Cüruf gözenekli yapıda olmasına karşın bu durum hava tesirlerine karşı dayanıklılığını etkilememektedir.

Cürufun soyulma mukavemeti değerlerin istenilen limitlere çekilebilmesi için metalik Fe'in bünyeden mümkün olduğunca uzaklaştırılması gerekmektedir. Metalik Fe'in ayrıştırılması ayrıca tesis içi geri dönüşüme de katkıda bulunacak ve üreticilere ekonomik yarar sağlayacaktır. Buna ek olarak yeterli yaşlandırma sonucunda CaO'in hidrate olması ile ortaya çıkan sönmüş kirecin soyulma mukavemetini artırması beklenmektedir.

Yapılan literatür taramasında EAO çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılması durumunda su kaynakları açısından bir tehlike oluşturmadığı, halk ve çevre sağlığı açısından bir risk içermediği, içerisindeki metallerin besin zinciri içinde birikmediği belirlenmiştir. Numunelere yapılan Ek-2 analizlerinde ise çelikhane cürufunun tehlikesi atık sınıfında yer aldığı ve yeterli yaşlandırma ile durağan (inert) atık sınıfına girebileceği belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında EAO çelikhane cürufunun yapay agrega olarak bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabileceği, yetersiz fiziksel özelliklerinin mekanik düzenlemeler ile istenilen limitler dahiline alınabileceği ve çevresel açıdan bir etkisinin olmamasının yanı sıra ülkemize ekonomik katkı sağlayacağı kanaatine varılmıştır.

Bu çalışma "Çelik Cürufunun Karayolu İnşaatında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması" (KGM ARGE 2012-7) projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. ADDDY, (2010). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazete. Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.
2. ASA, (2002). A Guide to the Use of Iron and Steel Slag in Roads. Wollongong/Australia: Australasian Slag Association.
3. AYGEİY, (2008). Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik, 05.07.2008 tarih 26927 sayılı Resmi Gazete. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.
4. BTAGKT, (2011). Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği, 17.06.2011 tarih ve 27967 sayılı Resmi Gazete. Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı.
5. DÇÜD, (2011). Türk Demir Çelik Sektörü. Mayıs 2011 tarihinde Demir Çelik Üreticileri Derneği: <http://www.d cud.org.tr> adresinden alındı.
6. DİKBAŞ, A., Timur, S., Yücel, O., Görgün, E., İyınam, A.F., Ertürk, M.C., Çalışkan, E. (2011). Elektrik Ark Fırnlı Çelik Tesislerinde Üretilen Çelik Cürufunun Dolgu, Temel ve Alttemel Olarak Kullanımına İlişkin Teknik Rapor.
7. EXPONENT, (2007). Human Health and Ecological Risk Assessment for the Environmental Applications of Steel-Making Slag: An Update. Prepared for Steel Slag Coalition Kelley Drye Collier Shannon 1050 K Street, NW Suite 400 Washington, DC 20007-5108. Prepared by Exponent 320 Goddard, Suite 200 Irvine, California 92618

August 2007.

8. FONTİNİ, K. (2009). Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates, *Waste Manag. Res.* 27, 288-294.
9. FRONEK, B. A. (2011). Feasability of Expanding the Use of Steel Slag as a Concrete Pavement Aggregate, MSci Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Cleveland State University, USA.
10. KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi.
11. NSA, (1998). Steelmaking Slag: A Safe and Valuable Product. Washington: The Steel Slag Coalition- National Slag Association.
12. PASETTO, M., BALDO, N. (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace slags, *Journal of Hazardous Materials*, 181, 938-948
13. PASETTO, M., & BALDO, N. (2011). *Construction and Building Materials*. pp. 3458-3468.
14. SGM (Sanayi Genel Müdürlüğü), (2013). Demir Çelik Sektörü Raporu, 2013/1
15. SOFILIC, T., MLADENOVIC, A., & SOFILIC, U. (2010). Characterization Of The EAF Steel Slag As Aggregate For Use In Road Construction. Sisak, Croatia.
16. YONAR, F., (2017). Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının Ve Karışım Performansının Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.