



DEMİR ÇELİK CÜRUF RAPORU

TÜRKİYE ÇELİK ÜRETİCİLERİ DERNEĞİ

16 KASIM 2015

ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK BAKANLIĞI

İÇİNDEKİLER

1. TÜRKİYE’DE FAALİYET GÖSTEREN DEMİR ÇELİK SEKTÖRÜNÜN MEVCUT DURUMU	3
1.1 2014 Yılında Oluşan Cüruf Atıklarının Türlerine Göre Miktarı ve İl Bazında Gösterimi	3
1.1.1 Geri Kazanım Miktarı ve Bertaraf	4
2. DEMİR ÇELİK SEKTÖRÜNDEN KAYNAKLANAN CÜRUF LARIN KULLANIM ALANLARI.....	5
2.1 Türkiye’de Mevcut Kullanım Alanları	5
2.1.1	C
üruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)	6
2.2.....	A
vrupa’da Kullanım Alanları	9
2.2.1 Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)	9
2.2.2 Cüruf Türlerine Göre Yeniden Kullanım (Alternatif Hammadde/Yan Ürün/İkincil Hammadde)	10
2.3.....	D
ünya’da Kullanım Alanları	13
2.3.1 Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)	13
Karayolu Üstyapısında Kullanımı	13
Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Cüruf Kullanımı	18
Çimento Betonü Agregası Olarak Kullanımı	19
Deniz Dolgusu ve Liman İnşaatında Cüruf Kullanımı	19
Çimento Üretiminde Cüruf Kullanımı.....	21
Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı	25
Gübre Üretiminde Kullanımı	26
Grit Üretiminde Kullanımı	26
Biyooksidasyon Prosesi pH Dengeleyicisi Olarak Kullanımı	26
Refrakter Üretiminde Kullanımı	27
Cürufların Çevre Yatırımlarında Kullanımı	27
3. KAYNAKÇA	29

1. TÜRKİYE’DE FAALİYET GÖSTEREN DEMİR ÇELİK SEKTÖRÜNÜN MEVCUT DURUMU

Türkiye genelinde, demir çelik tesisleri, Marmara, Ege, Karadeniz ve Akdeniz olmak üzere, 4 ana bölgede toplanmıştır. 2014 yılında, çelik sektörünün 50.2 milyon ton olan ham çelik kapasitesinin dağılımı incelendiğinde, 15.8 milyon ton ham çelik kapasitesi ile, Akdeniz bölgesini, 14.5 milyon ton ile, Marmara bölgesinin, 11.3 milyon ton kapasite ile, Ege Bölgesinin, 8.6 milyon ton ile, Karadeniz bölgesinin izlediği görülmektedir. 2014 yılı itibarıyla, 34 milyon ton ham çelik üretiminin gerçekleştiği Türk çelik sektörü, Dünyada, 8. ve Avrupa’da 2. sırada bulunmaktadır.



Şekil 1.1: Türkiye Çelik Haritası

1.1 2014 Yılında Oluşan Cüruf Atıklarının Türlerine Göre Miktarı ve İl Bazında Gösterimi

Demir çelik sektöründe, 24’ü Elektrik Ark Ocaklı (EAO), 3’ü Entegre ve geri kalan 4’ü İndüksiyon Ocaklı (İO), olmak üzere, 27’si Türkiye Çelik Üreticileri Derneği üyesi olan 31 tesis faaliyet göstermektedir.

Çelikhane cürufu, çelik üretiminde, EAO, İO veya Bazık Oksijen Fırınında (konvertörde) metal eriyiğinin rafinasyonu ve oksitlenmesi esnasında, yoğunluğunun çelikten daha az olması sebebiyle, çeliğin üzerinde oluşur ve 1300 °C veya daha yüksek sıcaklıklarda ocaktan alınır. Pota ocağında gerçekleşen ikincil metalurji işlemlerinde, alaşımlama, indirgeme, deoksidasyon, desülfürizasyon gibi prosesler sonucunda da, cüruf oluşur.

Çelikhane cürufu miktarı ton ham çelik başına, 150-200 kg arasındadır. 2014 yılında, Türkiye genelinde, 5.4 milyon ton civarında çelikhane cürufu, açığa çıkmıştır.

Yüksek fırın cürufu ise, yüksek fırında demir cevherinin indirgenerek sıvı ham demir elde edilmesi esnasında, cüruf yapıcı elementlerin oksitlenerek, sıcak maden üzerinde toplanmasıyla, oluşur.

Granüle yüksek fırın cürufları, su ile hızlı soğutulduğundan, camsı yapıya sahip özellikleri sayesinde, çimento sektöründe, hammadde olarak kullanılmaya elverişlidir.

Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de gösterilen çalışmada, TÇÜD üyesi olmayan, İzmir ilinde, Ede Demir Çelik ve Sider ile, Sivas ilinde, Sivas Demir Çelik, Kırıkkale ilinde, MKEK firmaları kapsam dışı tutulmuştur.

Tablo 1.1: 2014 Yılı Çelikhane Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları*(ton)			
	Çelikhane Cürufu	Atık/Bertaraf	Geri Kazanım
Kocaeli	874.327	494.117	380.210
Bursa	35.500	7.500	28.000
Tekirdağ	132.000	47.000	85.000
Çanakkale	459.343	50.529	408.814
Bilecik	8.400	4.000	4.400
İzmir	490.580	182.907	307.673
Zonguldak	449.848	261.327	188.521
Karabük	266.760	0	243.540
Samsun	150.206	150.206	0
Osmaniye	619.819	608.745	11.074
Hatay	1.131.695	901.155	230.540

1.1.1 Geri Kazanım Miktarı ve Bertaraf

Yüksek Fırın Cürufu

2014 yılında, Ülkemizde, Karabük, Zonguldak ve Hatay illerinde faaliyet gösteren 3 entegre tesisten çıkan 2.7 milyon ton, granüle yüksek fırın cürufunun tamamına yakın bir bölümü, klinker üretiminde kullanılmak üzere, çimento fabrikalarına gönderilmiştir.

Tablo 1.2: 2014 Yılı Yüksek Fırın Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları (ton)			
	Cüruf Miktarı	Atık	Geri Kazanım
Karabük			
Granüle YF cürufu	561.570	0	561.570
Havada Soğutulmuş YF Cürufu	405.480	0	405.480
Zonguldak			
Granüle YF cürufu	822.627	0	822.627
Havada Soğutulmuş YF Cürufu	0	0	0
Hatay			
Granüle YF cürufu	1.342.848	0	1.221.678
Havada Soğutulmuş YF Cürufu	54.154	53.721	433

Çelikhane Cürufu

Çelikhane cürufunun, parke, bordür, yağmur oluğu, hazır beton ürünleri, mikronize granül ürünler, raspa kumu, asansör ve beyaz eşya denge ağırlığı, asfalt agregası, alt ve üst temel malzemeleri ve muhtelif ebatlarda dolgu malzemesi olarak geri kazanımı yapılmaktadır.

Geri kazanıma gönderilemeyen çelikhane cürufu, yeterli alanı bulunan kuruluşlar tarafından, tesis içerisinde, geçici depolanmakta, alanı uygun olmayan tesisler tarafından ise, düzenli depolama alanında bertaraf edilmektedir.

2. DEMİR ÇELİK SEKTÖRÜNDEN KAYNAKLANAN CÜRUFLARIN KULLANIM ALANLARI

2.1 Türkiye’de Mevcut Kullanım Alanları

Yüksek Fen Kurulu Birim Fiyat Listesi

Çelikhane cürufundan elde edilen yapay agregası, 2015 yılı Yüksek Fen Kurulu birim fiyat listesine eklenmiştir. “Yapay Beton Agregaları” (TS 706 EN12620) ve “Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Malzemeler İçin Yapay Agregalar” (TS EN 13242) standartlarına göre, yapay agreganın ürün olarak kullanılabilmesi, uygunluk değerlendirme kuruluşlarından ürün belgesi alınması ile mümkün olmaktadır.

Tablo 2.1: Yüksek Fen Kurulu Birim Fiyat Listesi

	Yapay Beton Agregaları (TS 706 EN 12620 + A1)			
04.007/100A	Demir cürufu ince agregası	m3	Depoda	11,00
04.007/100B	Demir cürufu iri agregası	m3	Depoda	11,00
04.007/100C	Demir cürufu karışık agregası	m3	Depoda	10,00
	Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Malzemeler İçin Yapay Agregalar (TS EN 13242 + A1)			
04.007/110C	Demir cürufu karışık agregası	m3	Depoda	10,00
04.007/A	Silis (kuvars) kumu ve çakıllı (TS EN 12904)	Kg	İşbaşında	0,22

Agrega Standartları

Demir çelik sektöründe faaliyet gösteren kuruluşlardan, İçdaş’da, % 10’u manyetik ayırıcılarla demir olarak geri kazanımı yapılan çelikhane cürufunun, geri kalan %90’lık kısım, TS EN 13242 "İnşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı malzemeler için agregalar" standardına uygun bir ürün olarak inşaat mühendisliği işleri ile yol yapım agregası amacıyla satılmaktadır. Ekinciler Demir Çelik A.Ş.’nin de, TS 706 EN 12620 ve TS EN 13242 ürün standartları için, başvurusu olmuştur. Uygunluk belgeleri alındığında, standartlara uygun bir şekilde, yapay beton agregası ve yol yapım agregası olarak kullanılmak üzere, müteahhit firmalara satışının yapılması düşünülmektedir. Cüruf Kıırma-Eleme Tesisi için, ÇED Raporu bulunan Yazıcı Demir Çelik, tesis

faaliyete geçtikten sonra, cürufun yapay agrega olarak kullanımına ilişkin uygunluk belgesi almayı planlamaktadır.

Karayolları AR-GE Projesi (2013)

Çelikhane cürufunun karayollarında standart bir ürün olarak kullanılabilmesi için, Karayolları Genel Müdürlüğü ve İTÜ'nün birlikte yürüttüğü, üye kuruluşlarımızdan Çolakoğlu Metalurji ile Derneğimizce de desteklenen “Çelik Üretiminde Elde Edilen Cürufun Karayolu İnşaatında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması” başlıklı AR-GE projesi 2013 yılında başlamıştır.

Projeye ilişkin ara raporlarda, proje kapsamında, bugüne kadar yapılan laboratuvar çalışmaları ile, çelikhane cürufunun, içeriğindeki metallerin sıvı ortama verdikleri bileşikler önemsiz düzeylerde kaldığından, yer altı ve yüzeysel içme suyu kaynakları için tehlike oluşturmadığı, hayvanlar ve fauna üzerinde belirli bir etkisinin bulunmadığı, içeriğindeki metaller besin zincirine birikmediği, nehirler ve göller gibi su ortamlarının kalitelerine ve sucul yaşama olumsuz etkisinin olmadığı ortaya konulmuştur.

Proje yürütücüsü İTÜ'den alınan bilgilere göre, teknik ve idari çalışmaların tamamlanmasının ardından, farklı iklim koşullarında, cürufun etkilerinin belirlenmesi amacıyla, ülkemizin kuzey ve güney bölgelerinde iki deneme yolu yapılması planlanmış, Sakarya ili sınırları içinde, D-100 karayolu üzerinde bulunan İstanbul-Ankara güzergahında ilk yol yapımına başlanmıştır.

500 m. aşınma tabakası olarak, imal edilmesi planlanan sözkonusu deneme yolu için ihtiyaç duyulan 1.100 ton çelikhane cürufu, Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'den tedarik edilmiştir.

Eleme çalışmalarına, 27.07.2015 tarihinde başlanmış, 0-5 mm cürufun elenmesi, 31.07.2015 tarihinde, elek analizleri ise, 04.08.2015 tarihinde tamamlanmıştır. Tane boyutlarının, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'de verilen limitlerin dışında olduğu belirlenmiştir. İnce malzemenin yeniden kullanılabilmesi için, kırma işleminden geçirilmesi gerektiğinden, KGM'nin de önerdiği üzere, 0-5 mm. malzeme için kalker kullanılmasına karar verilmiştir.

17.08.2015 tarihinde trafik düzenlemesi yapıldıktan sonra, 19.08.2015 tarihinde deneme yolu, hiçbir problemle karşılaşmadan serilmiş ve sıkıştırma işlemleri tamamlanmıştır. 20.08.2015 tarihinde deneme yolundan alınan numuneler incelenmiş, bağlayıcı oranı ve sıkıştırma miktarının, şartnamede uygun görülen limitler dahilinde olduğu ve serimin başarılı bir şekilde yapıldığı belirlenmiştir.

21.08.2015 tarihi itibari ile Hatay Arsuz'da yapılması planlanan 2. deneme yolunun çalışmaları kapsamında, 26 Ağustos tarihinde kırım ve nakliye işleri başlamış, 27 Ağustos tarihinde ise tamamlanmıştır. 27 Ağustos tarihinde 5. Bölge Müdürlüğü'nde briketler hazırlanmış, 28 Ağustos tarihinde de, Ekinciler Demir Çelik'den alınan 450 ton cürufundan, karışım tasarımı hazırlanmış, Ekim ayı sonunda başlanan 500 metrelik deneme yol inşası, 6 Kasım tarihinde, tamamlanmıştır.

Deneme yolları tamamlandıktan sonra, sözkonusu yollardaki performans ölçüm sonuçlarına göre, “Çelikhane Cüruflarının Kullanımına İlişkin Mevzuat Önerisi”nin, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'e, ek olarak yayımlanması öngörülmektedir.

2.1.1 Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)

ERDEMİR A.Ş'de Yapılan Çalışmalar

Çelikhane Cürufalarının karayolu ve demiryolunda, çimento ve beton üretiminde kullanımına yönelik Erdemir A.Ş'de yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Karayolu ve Demiryolunda Kullanımı

- 2002 yılında, ERDEMİR - TÜBİTAK tarafından gerçekleştirilen “Çelikhane Cürufunun Farklı Uygulama Alanlarında Değerlendirilmesi” konulu proje kapsamında, ERDEMİR çelikhane cürufunun, yol temel malzemesi olarak, karayolu üst yapısında yapay agrega olarak kullanılması için gerekli tüm fiziksel ve kimyasal özellikleri taşıdığı, asfalt agregası olarak kullanımının mümkün olduğu, karayollarının üst yapısında kullanılmasının uygun olduğu, demiryolu balast malzemesi ve beton travers agregası olarak kullanılabileceğine dair Karayolları Genel Müdürlüğü'nden yazı alınmıştır.
- Çelikhane cürufunun karayolu inşasında dolgu malzemesi olarak kullanımı konusunda KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Merkez Laboratuvarlarında yapılan testlerin sonucunda ERDEMİR çelikhane cürufunun karayolu inşaatlarında dolgu malzemesi olarak kullanımının uygun bulunduğu tespit edilmiş ve bu husus KGM gönderilen bir yazı ile bildirilmiştir.
- Çelikhane Cürufunun Karayollarında Kullanımının araştırılması amacıyla KGM Merkez Laboratuvarına çelikhane numunesi gönderilmiş ve analizler sonucunda çelikhane cürufunun karayolları şartnamesi kapsamında karayollarında kullanılabileceği tespit edilmiştir.
- ERDEMİR çelikhane cürufunun demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabilmesi için TCDD şartnamesi ve TS 7043 standardında (Demiryolu balastları için agregalar) belirtilen organik kökenli madde içeriği, aşınma dayanımı, su emme oranı, donma dayanımı, vb. kriterleri taşıdığı belirlenmiştir. Bu nedenle çelikhane cürufunun demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Çimentoda Kullanımı

- Haziran 2005'te TÜBİTAK/MAM Malzeme Enstitüsü ile işbirliği içerisinde yürütülen "Çelikhane Cürufunun Çimento Katkısı Olarak Değerlendirme Araştırması ve Uygulanması" isimli proje tamamlanmıştır. Çelikhane cürufunun çimento ve klinker üretiminde kullanılabilmesi ve ülkemizdeki çimento fabrikalarının bu üretime başlayabilmesi için TS EN 197-1 (Çimento-Bölüm 1 - Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri) standardına "ulusal ek" hazırlanmasına ihtiyaç duyulmuştur.
- %16,85 ve %20,0 oranında açık havada soğutulmuş çelikhane cürufu kullanılarak, normal klinkerleşme sıcaklığının 100 °C altında klinkerleşme prosesi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal, fiziksel ve mekanik test sonuçlarına göre Portland Çimento 32,5 (PÇ 32,5) çimento sınıfına uygun çimento elde edilmiştir. Çelikhane cürufunun, Portland Çimento'ya %20 oranında ikame ettirilmesiyle hazırlanan karışımlarda, 27 ve 28 gün basınç dayanımlarında Portland Çimento'ya en yakın dayanımı göstermiştir.

Beton Üretiminde Kullanımı

- Beton agrega testleri sonuçlarına göre beton karışım reçeteleri hazırlanmıştır. Beton karışım reçetelerinde, hızlı soğutulmuş cüruf (4-8 mm) ve hızlı soğutulmuş cüruf (8 mm'den büyük) mıcır

yerine kullanılarak hazırlanan C20 Hazır Beton karışımı ile TS EN 206-1 standardında (Bu standart yerinde döküm ve ön yapımlı (prefabrik) yapılar ile binaların ve inşaat mühendisliği alanına giren yapıların ön yapımlı yapısal elemanlarında kullanılan betonları kapsar.) istenen 28 günlük küp basınç dayanımı sonucu en az olması gereken 250 kgf/cm²'lik değer sağlanmıştır. Beton karışımlarında çelikhane cürufaları en iyi sonuçları, 4-8 mm ve 8 mm'den büyük boyutlarda vermiştir. Bu nedenle beton karışım reçeteleri planlanırken bu boyutlardaki cürufun mıcır yerine kullanılması uygun çıkmıştır.

Ancak, beton üreticileri tarafından çelikhane cürufunun beton üretiminde agrega olarak kullanılabilmesi için TS standartlarına beton agregası olarak girmesi gerektiği, mevcut durumda çelikhane cürufunun TS beton agregası standardında bulunmaması nedeniyle çelikhane cürufundan üretilecek betonun da bir TS standardı olmayacağı bildirilmiştir. Çelikhane cürufunu agrega olarak kullanarak deneme beton üretimi yapabileceklerini, fakat bu üretimin sonucunun olumlu olması durumunda bile çelikhane cürufunun TS beton standardında bulunmaması nedeniyle üretilen betonun ticari bir ürün olamayacağı belirtilmiştir. ERDEMİR liman sahalarında ihtiyaç duyulması halinde, çelikhane cürufu kullanılarak tetrapod ve beton blok üretimine yönelik deneme beton üretiminin gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir.

- 01.07.2015 tarihinde OYAK Beton'a 1340 kg elenmiş çelikhane cüruf numunesi gönderilmiş ve çalışmalar devam etmektedir.

Sonuç olarak yapılan çalışmalarda, çelikhane cürufunun; çimento üretiminde, beton üretiminde, karayolu yapımında, demiryolu yapımında kullanılmasına yönelik olumlu sonuçlar alınmış, ancak çelikhane cürufunun bu alanlarda kullanımına yönelik fiili uygulamalar gerçekleşmemiştir.

Çelikhane cürufunun; çimento üretiminde, parke taşı/kilit taşı üretiminde, beton üretiminde (saha betonu, tetrapod/beton blok yapımı) agrega olarak ve karayolu yapımında değerlendirilebilmesi konularında ilgili kurum ve kuruluşlar ile temaslar, testler ve denemeler yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda çelikhane cürufunun;

- Karayolu dolgu malzemesi ve demiryolu balast malzeme olarak,
- Çimento sektöründe klinker üretiminde,
- Beton sektöründe agrega olarak,
- Düşük mukavemetli kilit taşı üretiminde

kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.

İSDEMİR A.Ş'de Yapılan Çalışmalar

Çelikhane Cürufalarının liman dolgu malzemesi olarak, karayollarında yapay agrega olarak, beton üretiminde ve inorganik gübre üretiminde kullanımına yönelik İsdemir A.Ş'de yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

- Cürufun Liman Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılmasına Yönelik Çalışmalar: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 05.10.2009 tarihinde verilen İsdemir Limanı 2. Etap Tevsi ve Dolgu Projesi ÇED Olumlu Belgesi ile çelikhane cürufunun deniz dolgusunda kullanılması uygun bulunmuştur. Söz konusu projenin Güney Konteyner Limanı dolgusunda 1.100.000 m³, Kuzey Dolgu Alanı Projesinde 856.000 m³ olmak üzere toplamda 1.956.000 m³ cüruf kullanılacaktır. Sonuç olarak

projede ihtiyaç duyulan 35 milyon tonluk dolgu malzemesinin 13 milyon tonu mevcut ve üretimden çıkacak olan cüruftan temin edilecektir.

- Çelikhane Cürufunun Karayollarında Kullanılmasına Yönelik Çalışmalar: Çelikhane Cürufunun Karayollarında Kullanımının araştırılması amacıyla Karayolları laboratuvarına çelikhane numunesi gönderilmiştir. Analizler sonucunda çelikhane cürufunun karayolları şartnamesi kapsamında karayollarında kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.
- İsdemir’de açığa çıkan cürufların karayollarında yapay agrega olarak kullanılmasının uygunluğunu tespit etmek için numuneler alınmış; “TS EN 13242 Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcı Malzemeler için Yapay Agregalar Standardı” kapsamında yapılacak deneyler ile analiz etmek üzere TSE Yapı Malzemeleri Laboratuvarına gönderilmiştir. TSE tarafında yapılan analizler olumlu sonuçlanmıştır.
- Çelikhane Cürufundan Beton Üretiminde Kullanımına Yönelik Çalışmalar: Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde TÜBİTAK tarafından desteklenen bir projede, cüruf kullanılarak çimentosuz beton üretmek için bilimsel araştırmalar yapılmaktadır. Üniversite, cürufu firmamızdan tedarik etmektedir. Ayrıca çelikhane cürufunun beton yapımında kullanılabilirliğinin araştırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda OYAK Beton’a çelikhane cürufu numuneleri gönderilmiştir.
- Çelikhane Cürufundan İnorganik Gübre Üretilmesine Yönelik Çalışmalar: Çelikhane cürufu, demir ve bitkiler için besin değeri bulunan elementleri içermektedir. Çelikhane cürufunun hammadde olarak kullanılmasıyla tarımsal faaliyetlerde kullanılabilecek inorganik gübre elde edilebilecek olup, topraktaki demir eksikliğini giderme ve toprak kalitesini iyileştirme çalışmalarına katkı sağlanabilmektedir. Denge Su Teknolojileri San. Ve Tic. Ltd. Şti. firması fabrikamızdan cüruf numuneleri temin ederek, içerisinde bitki besin elementlerinin kazanılması ve gübre üretimi araştırmaları yürütmektedir.

2.2 Avrupa’da Kullanım Alanları

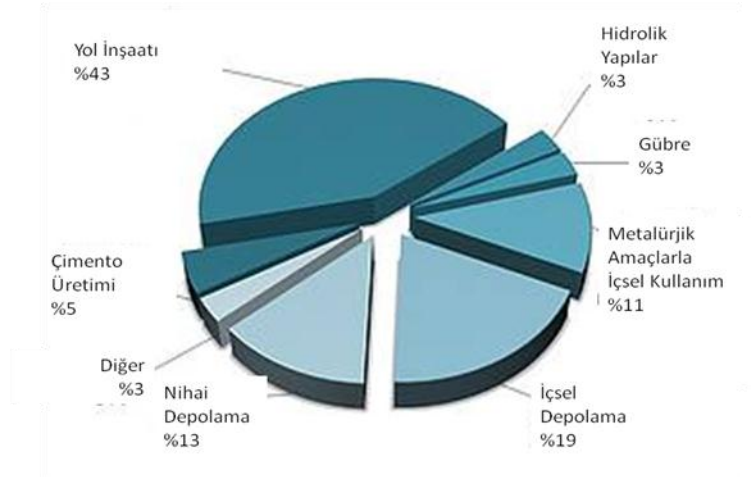
2.2.1 Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)

Avrupa Atık Katalogu, Avrupa Komisyonu tarafından 3 Mayıs 2000 tarihinde oluşturulmuş olup Atık Yönetimi Yönetmeliği çerçevesinde de ulusal mevzuata yer almaktadır. Katalog çerçevesinde belirtilen atık kodlarında cüruflar, yönetmelik eklerinde belirtildiği şekilde, 100201-Cüruf İşleme Atıkları ve 100202 İşlenmemiş Cüruf, kodlarıyla yer almaktadır. Ancak, Avrupa Atık Katalogu kapsamında cüruflarla ilgili en önemli gelişmelerden biri, Almanya AB Komisyonu yetkilileri tarafından önerilen ve Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen cüruf tanımlamalarıdır. Katalog çerçevesinde belirtilen husus şu şekildedir; granülasyon, pelletizasyon, köpürtme, ısıtma bağlantılı katılaştırma (solidification) ve değirmenleme (ayırma, kırma, eleme, öğütme) proseslerinden bir ya da daha fazlası yapılan cürufların atık olarak değerlendirilmediği vurgulanmıştır. Dolayısıyla belirtilen prosesler uygulanan cüruflara ait herhangi bir Atık Kodu, Avrupa Atık Kataloğu’nda yer almamaktadır (İTÜ TechnoBee, 2012, Euroslag, 2012).

2007 yılı AB Komisyonunun bildirisinde de Yüksek Fırın Cürufunun Atık Çerçeve Direktifi yan ürün tanımı kapsamında; kullanımına yönelik sürekli talep olması, üretim prosesinin ayrılmaz bir parçası

olarak üretilmesi ve başka işlemlerden geçmeden doğrudan proseste kullanılabilmesi sayesinde yan ürün olarak değerlendirilmektedir (COM(2007) 59 final, Euroslag, 2012).

Bazık Oksijen Fırın (BOF) Cürufu ve Elektrik Ark Ocağı (EAO) Cürufu, Çelik Cürufları olarak ifade edilmektedir. Çelik Cürufunun 2012 yılında Avrupa’da kullanım oranları Avrupa Cüruf Birliği verileri doğrultusunda Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Euroslag, 2014).



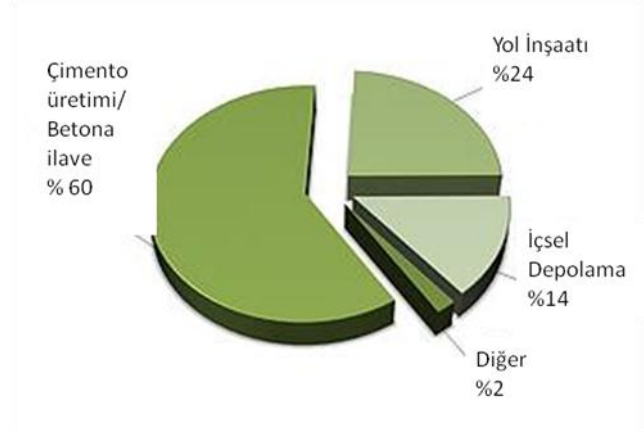
Şekil 2.1: 2012 yılı Çelik Cürufu (BOF ve EAF Cürufu) kullanım alanları (24,7 Mt)

Avrupa Cüruf Birliği verilerine göre 2012 yılında Çelik Cürufunun %68'i çeşitli uygulama alanlarında kullanılırken, %19'u ise sonradan kullanılması amacıyla geçici depolanmış, sadece %13'ü nihai depolanmaktadır. Nihai depolama oranı kriz nedeniyle 2010 itibariyle artış göstermiştir. Çelik cürufunun temel uygulama alanı, %43'lük oranla yol inşaatında agrega üretimidir. Metalürjik amaçlarla içsel kullanım oranı %11 iken, %3-5 aralığında küçük oranlarda da çimento üretiminde, hidrolik yapılarda ve gübre üretiminde kullanımı mevcuttur. Almanya'da Çelik Cüruflarının %68,3'ü inşaat materyali olarak (yol inşaatında, toprak hafriyatında, kırsal yol/patika inşaatında, hidrolik mühendislik işlerinde), %17,4'ü içsel geri dönüşümde, %5,5'i gübre olarak kullanılırken; sadece %8,8'i depolamaya gönderilmiştir (FEhS, 2008).

2.2.2 Cüruf Türlerine Göre Yeniden Kullanım (Alternatif Hammadde/Yan Ürün/İkincil Hammadde)

Belirtildiği üzere; Avrupa'da Yüksek Fırın Cürufları atık olarak değil, yan ürün olarak değerlendirilmektedir.

Avrupa Cüruf Birliği'nin cürufların geri kazanımına ilişkin çalışmalar yürütmekte olup, 2000 yılından beri her iki yılda bir cürufların kullanım alanlarına yönelik araştırma yapmaktadır. Bu doğrultuda 2012 yılı istatistiklerine göre Yüksek Fırın Cürufunun kullanım alanları Şekil 2.2'de gösterilmektedir (Euroslag, 2014).



Şekil 2.2: 2012 yılı Yüksek Fırın Cürufu kullanım alanları (27,6 Mt)

Avrupa Cüruf Birliği verilerine göre 2012 yılında Yüksek Fırın Cürufunun %60'ı çimento üretimi ya da beton ilavesi olarak kullanılırken %24'ü yol inşaatında agrega olarak kullanılarak yan ürün olarak değerlendirilmiştir. Yüksek Fırın Cürufunun %14'ü de içsel depolama yapılmaktadır. 2010 yılına kadar birçok Avrupa ülkesinde YF Cürufu kullanım oranı %100 iken, 2009 yılında yaşanan ekonomik krizin etkileri nedeniyle 2010 yılı itibariyle cüruf kullanım oranı %90'lara düşmüş ve içsel depolama oranları artmıştır. Almanya'da ise 2006 yılında YF Cüruflarının %72,2'si çimento ham maddesi olarak, %27,6'ü yol inşaatında, %0,2'si ise gübre olarak kullanılmıştır (FEHS, 2008).

Avrupa ülkelerinde Yüksek Fırın Cüruflarının imalat süreci ve uygulama alanları Tablo 2.2'de, Çelik Cüruflarının uygulama alanları da Tablo 2.3'de belirtilmektedir (Euroslag, 2012).

Tablo 2.2: Yüksek Fırın Cüruflarının Avrupa'daki Uygulama Alanları

Cüruf	İmalat Süreci	Uygulamalar (örnekler)
Parça Cürufu (Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu-ABS)	Kırma ve Eleme Ayrıca öğütülmemiş cüruf olarak da mevcuttur.	Agrega olarak; • bitümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımında (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) • bağlayıcısız karışımında • atıksu arıtmada • demiryolu balastında • dolguda • çatı kaplamada • zemin stabilizasyonunda İmalat olarak; • taş yünü • cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak) • gübre
Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GBS/GGBS)	Yüksek basınç, yüksek hacimde su spreyi ile eriyik cürufun hızlı söndürülmesi, granüle cürufun çimento inceliğine öğütülmesi	Agrega olarak; • bitümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) • bağlayıcısız karışımlarda • dolguda • kumlamada • zemin stabilizasyonunda İmalat olarak; • çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar • beton (GGBS) • gübre (GGBS) • taş yünü • cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak)

Tablo 2.3: Çelik Cüruflarının Avrupa'daki Uygulama Alanları

Cüruf	İmalat Süreci	Uygulamalar (örnekler)
Bazik Oksijen Fırın Cürufu (Çelik Cürufu-BOS)	Kırma ve Eleme Hava ile soğutulmuş ve sulanmış cüruf	Agrega olarak; • bitümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) • yüksek kayma dirençli üst tabakalarda • bağlayıcısız karışımlarda (bağlayıcısız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.) • barajlarda (yol inşaatı ve gürültü koruma) • atıksu arıtmada • demiryolu balastında • dolguda • koruyucu anroşman taşı • istihkam duvarı ve gürültü emici duvarlarda • zemin stabilizasyonunda İmalat olarak; • çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar • taş yünü • cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak) • gübre
Elektrik Ark Fırın Cürufu (Çelik Cürufu-EAF C) Karbon çelik üretimi	Kırma ve Eleme Hava ya da su ile soğutulmuş ve sulanmış cüruf	Agrega olarak; • bitümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) • yüksek kayma dirençli üst tabakalarda • bağlayıcısız karışımlarda (bağlayıcısız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.) • barajlarda (yol inşaatı ve gürültü koruma) • atıksu arıtmada • demiryolu balastında • dolguda • yüzey katmanları sızdırmazlıkta • koruyucu anroşman taşı • istihkam duvarı ve gürültü emici duvarlarda • zemin stabilizasyonunda İmalat olarak; • çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar • taş yünü • cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak)
Elektrik Ark Fırın Cürufu (Çelik Cürufu-EAF S) Paslanmaz/yüksek alaşımlı çelik üretimi	Kırma ve Eleme Hava ya da su ile soğutulmuş ve sulanmış cüruf	Agrega olarak; • bitümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) • bağlayıcısız karışımlarda (bağlayıcısız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.) • barajlarda (yol inşaatı ve gürültü koruma) • dolguda • yüzey katmanları sızdırmazlıkta • yüksek kayma dirençli üst tabakalarda • çatı kaplamada • koruyucu anroşman taşı • istihkam duvarı ve gürültü emici duvarlarda • endüstriyel nötralizasyon ürünlerinde • zemin stabilizasyonunda İmalat olarak; • çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar • taş yünü • cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak)

Avrupa ülkelerinde cürufların mevcut statüsü incelendiğinde Yüksek Fırın Cüruflarının ürün ya da yan ürün olarak tanımlandığı görülmektedir. Almanya'nın Kuzey Ren-Vestfalya bölgesinde Bazik Oksijen Fırın Cürufları da atık olarak değerlendirilmemekle birlikte işlenmiş BOF Cürufu ürün olarak tanımlanmaktadır. Almanya'da spesifik olarak bazı Elektrik Ark Ocaklı tesislerde, örneğin BSW tesisinde, açığa çıkan cüruf da atık olarak değerlendirilmemektedir (Euroslag, 2012).

2.3 Dünya’da Kullanım Alanları

Dünya Çelik Birliği’nin (worldsteel, 2014) çelik endüstrisinin yan ürünleri ile ilgili yayımlamış olduğu bilgi notunda; çelik cüruflarının (BOF ve EAO Cürufları) bir kısmının geri kazanılarak fırında veya sinterde kullanılabildiği ve yaklaşık %50 geri kazanılmış cürufun inşaat uygulamalarında öncelikli olarak da yollarda kullanıldığı belirtilir. Çelik cürufunun yüksek oranda serbest kireç içermesi inşaat alanında uygulanmasını sınırlamaktadır, serbest kirecin ayrılmasını geliştirmek için, çeşitli teknolojiler geliştirilmektedir. Ayrılan kireç; gübre olarak ya da çimento ve beton üretiminde, atıksu arıtmada ve deniz kıyı bloklarında kullanılabilir. Önceleri katı atık sahalarında bertaraf edilen cüruf, şimdi satılabilir bir ürün olarak kullanılabilmektedir. Dünyada çelik cürufunun geri kazanım oranı ortalama %80’in üzerinde iken, demir cürufu (YF Cürufu) %100 geri kazanılır. Çevresel ve ekonomik yarar açısından, birçok ülkede halen, çelik cürufu kullanımının artma potansiyeli vardır.

Amerika Ulusal Cüruf Birliği’nin (NSA, 2003) yayımladığı bildiriye; demir çelik cüruflarının yerleşim, tarım, endüstri ve inşaat uygulamalarında kullanılabilecek uygun agrega materyalleri olduğu belirtilmiştir. Cüruflar, USEPA ve ASTM (American Society for Testing Materials) prosedürleri takip edilerek testlerden geçirilmiş ve cüruf uygulamalarının çevre dostu bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir. Cüruflar 1600°C’de oluştuğu için organik, yarı-organik ya da uçucu bileşikler içermezken; kalsiyum, demir, silisyum, alüminyum, magnezyum oksitler ve kalsiyum silikat, alüminosilikat, alüminoferrit bileşikleri içerir. Birçok cüruf test edilerek yapılan risk değerlendirme analizleri ve İnsan Sağlığı ve Ekolojik Risk Değerlendirmesine (HERA) göre; demir çelik cüruflarının yerleşim, tarım, endüstri ve inşaat uygulamalarında kullanımı insan sağlığına ve çevreye anlamlı bir tehdit oluşturmamaktadır. Cüruftaki metallerin insanlar, hayvanlar ya da bitkiler tarafından alınması ya da bitkilerde biyolojik birikimi söz konusu değildir.

Cüruf; güvenle ve başarıyla asfalt betonu, Portlant çimento betonu, yol dolgusu, toprak yol, otopark, yürüme yolu gibi birçok uygulamada yapı agregası olarak kullanılmaktadır. Portland çimento üretimi, toprak remineralizasyonu ya da pH ilavesi gibi tarımsal uygulamalar ve endüstriyel atıksu iyileştirilmesi gibi uygulamalarda da cüruf kullanımı mevcuttur. Demir çelik cürufları; su kalitesi ve akuatik yaşamı etkilemeden akarsular ve göller gibi akuatik ortamlarda da güvenle uygulanabilmektedir (NSA, 2003).

2.3.1 Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)

Yüksek Fırın Cürufları yan ürün olarak değerlendirildiğinden, özellikle Çelik Cüruflarının geri kazanımına yönelik çalışmalar özetlenmiştir.

Karayolu Üstyapısında Kullanımı

Karayolu üstyapıları kullanılan malzemelerin niteliklerine göre, esnek veya rijit üstyapılar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Üstyapı tipi, teknik ve ekonomik bazı parametreler göz önüne alınarak seçilir. Ülkemizde yer alan yolların çok büyük kısmı esnek tip üstyapıya sahiptir. Bu tip üstyapı genel olarak, en üstte kaplama (aşınma ve altında binder katmanları), altında temel ve bunun da altında alt temel tabakalarından oluşmaktadır.

Yol üstyapısının her bir tabakasındaki kullanılan malzemeler, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından büyük önem taşırlar. Esnek yol üstyapısının önemli kısmını

oluşturan agregaların özellikleri esnek üstyapının performansını çok ciddi ölçüde etkiler (Alataş, Somunkıran, Ahmedzade, 2006).

Birçok ülkede, karayolu üstyapı tabakalarının yapımı için gerekli olan kaliteli doğal agregaların temini giderek zorlaşmaktadır. Çünkü merkezi hükümetin yeni düzenlemeler getirmesi nedeniyle ve yerel yönetimlerin daha bilinçli davranması neticesinde taş ocaklarının açılması ve işletilmesi giderek daha sıkı kurallara tabi olmaktadır. Ayrıca, yerleşim birimlerine yakın olan mevcut ocaklarda ve dere yataklarında kaliteli malzemenin tükenmeye başlaması nedeniyle, yerleşim birimlerine daha uzak bölgelere yönelme söz konusudur. Bu durum nakliye maliyetlerinin giderek artmasına neden olmakta ve yapım maliyetlerini de etkilemektedir. Kaliteli ve kısmen maliyetli olan doğal agregaları daha verimli kullanma gerekliliği ortadadır. Bu nedenle, kütleli miktarda yapı malzemesi gerektiren, yol inşaatı gibi yapım işlerinde endüstriyel atıklar (ikincil agregalar) kullanılarak doğal kaynaklarımızın verimli kullanılmasına katkı sağlanabilir. Yol inşaatında kullanılabilen endüstriyel yan ürünler sıralanacak olursa; çelikhane cürufı, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıkları, sökülmüş beton yol kaplamaları, sökülmüş asfalt yol kaplamaları ve gübre fabrikası atıkları başta gelmektedir.

Cüruf, karayolu yapımına dair şartnamelerde agregalarla ilgili şartları sağladığı takdirde, üstyapının kaplama, temel ve alt temel tabakalarında güvenle kullanılacak bir agrega malzemesi olarak kabul edilmekte, ilgili standartlar oluşturulmuş bulunmakta ve birçok ülkede, hiç bir sorun yaratmadan kullanılmaktadır. Üstyapısında cüruf kullanılmış bir yolun görünümü Şekil 2.3’de yer almaktadır.



Şekil 2.3: Üstyapısında Cüruf Kullanılmış Yol Görünümü

Karayolu üstyapısında kullanılan agregalar, yola etki eden yüklerin oluşturduğu gerilmelere karşı önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar ve alınan sonuçlar, çelikhane cürufunun, bir agrega malzemesi olarak karayolu üstyapısının her bir katmanında teknik olarak güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. İlgili araştırmalar cüruftan elde edilen üstyapı malzemesinin dayanıklılığının doğal olarak elde edilenlerle eşdeğer olduğuna işaret etmektedir.

Çelikhane cürufu, dayanımı yüksek olduğu için yol üstyapısının yanı sıra altyapı malzemesi olarak da; arazide tesviye tabakasında, yol inşaatında, su yapıları için dolgu ve balast malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Cürufun yol inşaatında uygulamaya etkisi olan özellikleri; kireç dağılımı, demir dağılımı, serbest kirece bağlı genleşme, gözenekler, yetersiz kristalleşmedir. Bu özellikler dolayısıyla uygulamada serbest kirece bağlı genleşme gözlemlenebilir. Bunun önüne geçilmesi ve cürufun yapısında doğal olarak mevcut olan serbest kirecin özelliklerini kaybetmesi için yola serilmeden önce belli bir

süre bekletilmelidir. Kırılma dayanımı, demiryollarında kullanılan balast malzemeleri ile mukayese edilecek kadar iyidir.

Karayolu kaplamasında kullanılan, sıcak asfalt ile karıştırılmış ve yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmış agregadan oluşan karışımlar asfalt betonu olarak isimlendirilmektedir. Asfalt betonu sıcakken kaplama yapılacağı bölgeye nakledilip optimum yoğunluk değerlerini elde etmek için düzgün bir şekilde serilip sıkıştırılmaktadır. Asfalt betonu, inşa edilen yolun aşınma ve binder tabakalarını oluşturmakta olup, yüksek stabilite, dayanıklılık, esneklik, kayma-sürtünme dayanımı, işlenebilirlik ve ekonomiklik gibi birçok özelliği taşımaktadır.

Cüruf çok yoğun ve sert bir malzemedir. Stabilitelerinin yüksek olmasından dolayı bazı durumlarda daha ince asfalt kaplama tabakası serilmesine imkan sağlayabilmektedir. Kararlılıkları, sertlikleri ve iyi bağlanma özellikleri kaliteli asfalt betonu üretilmesini mümkün kılmaktadır. Cüruf agregalarının köşeli bir yapıda olması ve böylece tanelerin birbirlerine daha sıkı kenetlenebilmeleri cüruf asfalt betonu kaplamaların tekerlek izi oluşum dirençlerini artırmaktadır. Tekerlek izi oluşumu bakımından sorunlu olan ülkeler arasında yer alan ülkemizde bu sorunun aşılmasında asfalt betonu üretiminde cüruf kullanımının önemli katkısı olabileceği düşünülebilir. Keza cüruf ile imal edilen asfalt kaplamalar, kayma-sürtünme dayanımına sahip olmaları nedeniyle karayollarında trafik güvenliğini de arttıracaktır. Cüruf agregalarının bitüm ile kuvvetli bağ oluşturabilme özelliğinden dolayı, soyulma direnci yüksek asfalt betonu üretilebilmektedir. Cüruf tanelerinin dayanımlarının yüksek olması ve tanelerin birbirleri ile çok iyi kenetlenebilmeleri, yüksek sıcaklık koşullarında bile asfalt betonunun kalıcı deformasyona direncini artırmaktadır. Bünyelerinde daha uzun süre ile ısıyı tutabilmektedirler. Bu özellikleri asfalt betonu serme ve sıkıştırma işlemleri için avantaj oluşturmaktadır. Çünkü sıcak karışımın serme ve sıkıştırılması soğuk karışıma nazaran çok daha kolaydır.

Serbest kireç içerdikleri için % 5 civarında genleşme potansiyeli söz konusudur. Ancak çok uygun fiziksel özelliklerinden dolayı daha kaliteli ve uzun ömürlü asfalt üretimine imkân sağlamaları, taşıma maliyetlerindeki artışı tolere edebilmektedir. Potansiyel hacimsel genleşme ise, cürufta bulunan kirecin hidratasyonu amacıyla uygun yaşlandırma prosesinden geçirilmesiyle kolaylıkla çözülebilmektedir. Yaşlandırma işlemi, stok sahalarında cürufların atmosferik koşullarda bir süre bekletilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu süre genellikle 6 ay'dır. Ancak buharlı yaşlandırma prosesinin daha kısa sürelerde oldukça etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Yaşlandırma prosesinin hızlı gerçekleşmesi için G. Kore Posco Şirketinde bu konuda tesis geliştirilmiştir.

Diğer taraftan, asfalt-agrega karışımlarında agreganın belirli bir miktar, filler ihtiva etmesi istenilen karışım özelliklerini ve performansı sağlamak için şarttır. Filler, toplam agreganın küçük bir yüzdesini oluşturmaya karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler miktarı, gerekli olan asfalt çimentosu oranını, hava boşluğu oranını, akma ve stabilite değerini yakından etkilemektedir. Belirli bir orana kadar filler boşlukları doldurduğu için, ince agrega gradasyonunu değiştirir ve böylece agrega tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayarak daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar.

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agreganın hazırlanması sırasında, malzeme ocaklarından temin edilen iri agreganın kırılması ile elde edilen taş tozunun (fillerin) miktarı, genellikle yeterli olmamaktadır. Bu gibi durumlarda eksik kalan filler yerine temini daha kolay olan başka bir malzemenin kullanılması yoluna gidilmektedir. Filler olarak kullanılabilir olan alternatif malzemeler hidrate kireç, çimento, mermer tozu, baca tozu veya cüruf tozu olabilmektedir. Asfalt çimentosu-

agrega karışımlarında agreganın belirli bir miktar, filler ihtiva etmesi istenilen karışım özelliklerini ve performansı sağlamak için şarttır. Cürufun yol inşaatında kullanımı ile ilgili çalışmalar, son yıllarda cüruf miktarının artması ile birlikte yaygınlaşmıştır. Bunun sonucunda, demir çelik cürufu tozunun bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak %5-10 arasındaki oranlarda kullanılabileceği de belirlenmiştir (Yılmaz & Süttaş, 2008).

The Permanent International Association of Road Congresses (Yol Kongreleri Daimi Uluslar arası Birliği, PIARC) tarafından, yol-inşa endüstrisinde geleneksel malzemelerin yerine kullanılabilecek malzemeler; konvansiyonel olmayan doğal kaynaklar, endüstriyel yan ürünler ve atıklar şekilde sınıflandırılmıştır (Pasetto & Baldo, 2011).

İtalya'da EAO Cüruflarının asfalt betonu uygulamalarında kullanılabilirliğinin araştırılması üzerine yürütülen çalışmanın sonuçlarından EAF cüruflarının, doğal agrega ile karşılaştırıldığında, yeterli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip oldukları, ayrıca çevresel olarak uyumlu ve kimyasal olarak uygun özellikte oldukları tespit edilmiştir (Pasetto & Baldo, 2011).

EAO Cüruflarından üretilen agrega kullanarak inşa edilen asfalt kaplamalı yol uygulamalarına pek çok ülkede başvurulmaktadır. Örneğin Tayland'da 2000 yılından itibaren Siam Steel Mill Service Ltd. tarafından inşa edilen asfalt kaplamalı yollar başarı ile kullanılmaktadır (Wittayangkoon, 2007).

Cürufun bitümlü sıcak asfalt karışımında uygulanmasına ait bir görüntü Şekil 2.2.4'te görülmektedir (İTÜ Technobee, 2012).



Şekil 2.4: Cürufun Asfalt Malzemesi Olarak Kullanımı

Amerikan Federal Karayolları İdaresi (FHWA) karayolları, köprüler ve tünellerin inşaatı, bakımı ve korunması üzerinde yönetimi sağlayarak, devlet ve yerel kurumlara teknik destek sağlayan bir kurumdur. FHWA çelik cüruflarının asfalt betonda kaba ya da ince agrega olarak kullanımına dair kullanıcı kılavuzu yayımlamıştır. Bu kılavuzda belirtildiği üzere; Amerika’da en az 11 eyalette çelikhane cürufları asfaltta agrega olarak kullanılmaktadır. Çelikhane cürufu agregalı sıcak karışım asfaltının olumlu özellikleri; iyi sürtünme ve sıyırma direnci, yüksek stabilite ve tekerlek izi direnci olarak belirtilmektedir (FHWA, 2012).

1992 yılında yayımlanan bildiride Amerika Ulusal Cüruf Birliği; çelikhane cüruflarının özellikle yüksek fırınlarda demir ve flaks materyali kaynağı olarak ve spesifik alanlarda yüksek nitelikte mineral agrega olarak kullanıldığını belirtmiştir. Çelikhane cüruflarının, üstün bir kayma direnci özelliği gösterdiği asfalt üst yapılar ve demiryolu balastında kullanımında hacim değişikliği problemiyle karşılaşmamaktadır. 1992 yılında ABD’de çelikhane cüruflarının %35’i yol temeli, %16’sı dolgu, %13’ü asfalt agregası, %3’ü ise demir yolu balastı olarak kullanılmıştır (NSA, 1992).

Çelikhane cürufu, ABD’de, sıcak karışım asfaltında ve yüzey işlemlerinde, uygun seçim, yaşlandırma, işlem ve testler ile, başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Alabama, California, Illinois, Indiana, Kentucky, Louisiana, Michigan, Missouri, Pennsylvania, South Carolina ve West Virginia olmak üzere, en az 11 eyalette, asfalt parkelemede ve Louisiana’da yüzey işleminde kullanılmaktadır.

Sıcak karışım asfaltta agrega olarak kullanılan cürufların iyi sürtünme özellikleri, sıyırma direnci, yüksek stabilite ve tekerlek izi-plastik deformasyon direnci gibi üstün özellikleri tespit edilmiştir. Ancak uygun olmayan veya iyi işlenmemiş cürufların kullanımı, performans problemine neden olmaktadır. Örneğin, ABD’de Illinois, Indiana ve Minnesota gibi bir kaç eyalette bazı yerlerde, Kanada, Almanya ve Japonya’da kaldırımlarda çatlamalar gözlenmiştir. Bu çatlamanın cüruf bünyesindeki serbest CaO ve MgO ile birleşmiş hacimsel dengesizlik ile ilişkilidir. Serbest CaO veya MgO hidratasyonu genişlemeye ve cüruf partiküllerinin çatlamasına neden olmaktadır. Cürufların kullanımında bu iki parametrenin belirli bir miktarın altına indirilmesi gerekmektedir (TOBB, 2012).

ABD’de Yüksek Fırın Cüruflarının %90’ı hava soğutmalı, %7’si granüle haldedir. 1992 yılında hava soğutmalı cürufların %46’sı yol temeli, %16’sı asfalt beton agregası, %10’u beton agregası, %10’u yapısal dolgu, %1’i demiryolu balastı ve %1 mineral yün alanlarında kullanılmaktadır. Granüle yüksek fırın cüruflarının %84’ü yol temellerinde ve dolguda kullanılırken, %8’i beton ince agregası olarak kullanılmıştır. Çimentoda kullanımı o yıllarda çok yaygın olmayıp, araştırmalar geliştirilmiştir. (NSA, 1992). ABD’de yıllık yaklaşık 19 milyon ton demir çelik cürufu, 150 milyon \$ ticari değeriyle, inşaat işlerinde kullanılmak amacıyla satılmaktadır, cüruf ürünlerinin yarısından fazlası yol inşaatlarında değerlendirilmektedir (NSA, 2003).

Kanada’da asfalt karışımlarında çelik cürufunun kullanımı Ontario Ulaştırma ve Haberleşme Bakanlığı spesifikasyonlarını sağlayarak 1980’lerden itibaren kullanılmaktadır.

Australasian Cüruf Birliği’nin (ASA, 2013) kılavuzunda; 2010 yılında Avustralya’da açığa çıkan 2.67 Mt demir çelik cürufunun %33’ü yüksek katma değerli çimento uygulamalarında kullanılırken, %50’sinin yol inşaatlarında ve yapı işlerinde değerlendirildiği belirtilmiştir. 1990’larda demir çelik cüruflarının etkin bir şekilde işlenmesi %30-40 oranlarında iken, şimdi bu oran %85’in üzerindedir. Demir çelik cüruflarından elde edilen ürünlerin yüksek kalitede, güvenle ve aynı şekilde piyasa yer alması amacıyla belli standartlara tabi olunmaktadır. Cüruf, yol temelinde kullanılırken NSW RMS R73 ve

dolguda kullanılırken NSW RMS 3071 şartnamesini sağlamaktadır. Çelik Cüruflarından elde edilen yol temel malzemesi, ağır bağlı yol kaplama amacıyla ilgili spesifikasyonları sağlayarak yollarda uygulanmaktadır. Çelik cürufunun tipik kullanım alanları; asfalt agregasında, yol kaplama ve alt temel tabakalarında kullanımıdır. Çelik cürufu bağlayıcısız yol kaplama, bağlayıcılı yol kaplama ve agrega ayrı ayrı teknik şartnamelerle tanımlanarak kullanılmaktadır (ASA, 2014).

Australasian Cüruf Birliği'nin demir çelik cüruflarının yollarda kullanımına dair hazırladığı kılavuzda ise; çelik cüruflarının dolgu, temel, alt temel malzeme olarak yol kaplamalarında kullanıldığı belirtilmektedir. Örneğin; %95 BOF Cürufu ile %5 uçucu kül karıştırılarak yoğun yollarda alt temel malzemesi olarak kullanılmaktadır ya da EAO Cürufu ile %40 oranında mevcut temel materyali karıştırılarak, RTA 3051 spesifikasyonlarını sağlayarak, yol temel malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çelik cürufları bütün asfalt ve püskürtmeli kaplama uygulamalarında özellikle ağır vasıtalı ve yüksek kayma gerilmeli yollarda da yaygın olarak kullanılabilir (ASA, 2002).

Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Cüruf Kullanımı

Balast, platform üzerine konan traverslerin içinde gömülü oldukları kırma taş tabakasına denir (Şekil 2.5). Demiryolu üstyapı sisteminde balastın başlıca üç görevi vardır. Bu görevlerin başında dingillerden raya ve traverse gelen düşey yükleri platform üzerinde daha büyük alana yaymak ve yatay tesirler neticesinde ray ve travers çerçevesinin hareketlerine karşı koymak gelir. Balastın ikinci görevi, vagonların üzerinde yuvarlandıkları yola bir miktar elastikiyet vermektir. Hızın çok arttığı bu zamanda yolda bir miktar elastikliğin bulunması, yolcu konforu ve vagon ile yolun bakımı için faydalıdır. Balastın üçüncü görevi ise platform üzerinde bitkilerin bitmesine engel olması ve bazı durumlarda platformu dona karşı muhafaza etmesidir. Çelikhane cürufunun fiziksel özelliklerinin hem standart değerlere, hem de DDY şartnamesinde belirtilen değerlere göre uyumlu olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufu balast malzemesi olarak kullanılması için TSE ve DDY şartnamesine göre gerekli özellikleri sağlamaktadır. DDY Yol dairesi Başkanlığı Varyantlar Grup Müdürlüğü Alt Yapı laboratuvarında, TS 7043 standardının gerektirdiği testler yapılmıştır. Çelikhane cürufu kullanılarak yapılan test sonuçları, TS 7043'de belirtilen balast özelliklerini taşımaktadır (İTÜ TechnoBee, 2012).



Şekil 2.5: Cürufun Demiryolu Balastı Olarak Kullanımı

Çimento Betonlu Agregası Olarak Kullanımı

Çimento, agrega ve su karışımından oluşan çimento betonu üretiminde doğal kaynaklardan elde edilen agregalar en büyük maliyet girdisini oluşturmaktadır. Ayrıca kullanılan doğal agregaların elde edilmesi sürecinde yadsınamaz çevresel etkiler bulunmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı doğal agregaların yerine kullanılabilir; benzer özellikte, ucuz ve elde edilmesinde çevresel olumsuzlukların minimize edildiği bir hammadde bulunması teknolojik bir zorunluluk halini almıştır. Bu sebeplerden dolayı, Avrupa bazında çelik üretimi ile beraber oluşan bir çıktı olan ve yıllık 10 milyon tonu bulan EAF cürufalarının çimento betonu imalinde doğal agrega yerine kullanımı en uygun seçenek olarak gözükmektedir (Pellegrino & Gaddo, 2009). Bu alanda yıllardır yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalar, iyi irdelenmiş ve endüstriyel uygulamaya başarı ile aktarılmıştır (Danieli Environment, 2010, İTÜ TechnoBee, 2012).

Çelik Cürufaların beton üretiminde kullanılması ile ilgili bir Japon Standardı (JIS A 5011-4:Slag aggregate for concrete-Part 4:Electric arc furnace oxidizing slag aggregate,2013) bulunmakta ve 2003 yılından bu yana çelik cürufalı agregalar Japonya’da beton üretiminde kullanılmaktadır (Sakaki, 2015).

Manso ve arkadaşları tarafından 2006 yılında İspanya’da yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre; EAO cürufalarından elde edilen agrega ve doğal agrega karışımlarından üretilen çimento betonu çok iyi mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir. Bu çalışma cüruf agregalı çimento betonu numunelerine uygulanan çeşitli testleri içermektedir. Çimentodaki bileşenlerin cüruf agregası ile etkileşimleri, çimento betonunun donma ve nem gibi çevresel etkilere karşı davranışlarını irdeleyen bir takım testler yürütülmüştür. Doğal agrega ile yapılan karışımlarda hem çevresel etkilere dayanım hem de mekanik özellikler bakımından kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre cüruf bazlı agregalar mekanik özellikler bakımından kullanışlıdır. Ancak oluşan çimento betonunda porozite oluşumuna sebep olmaktadır. Bu engelin önüne şarja yapılabilecek bazı ilaveler ile geçilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca numunelerin yaşlandırma testlerinde de olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Toksiklik testleri de kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır (Manso, Polanco, Losanez ve Gonzalez, 2006).

Deniz Dolgusu ve Liman İnşaatında Cüruf Kullanımı

Dünya genelinde ve özellikle çevre bilincinin gelişmiş olduğu ülkelerde, doğal yapıların ve doğal kaynakların kullanımının minimizasyonuna yönelik önlemler uygulanmaktadır. Bu kapsamda EAO cürufalarının en önemli kullanım alanlarından birisi de deniz ile ilgili yapılaşmalarda ve sahil şeritlerinin ıslahında kullanımıdır. Bilindiği üzere, sahil şeritlerinin ıslahı (örneğin Karadeniz oto yolu) ve kıyı şeridinde gerçekleştirilen yapılaşmaların hidromekanik etkilere karşı korunumunu sağlamak üzere oluşturulması gereken tahkimat alanlarında çok önemli miktarda çimento betonu ve/veya anroşman kullanımı gereklidir. Pellegrino ve arkadaşları tarafından 2009 yılında İtalya da yürütülen bir çalışma ile EAO cürufalarının çimento betonu üretiminde doğal agrega yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Agregası olarak EAO cürufalarının kullanıldığı çimento betonu numunelerinin basınç ve çekme dayanımları ve elastik özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonucunda EAO cürufaları kullanılarak üretilen çimento betonu numunelerinin doğal agrega kullanılarak üretilenlere kıyasla benzer ve kısmen daha iyi dayanım özellikleri gösterdikleri tespit edilmiştir (Pellegrino & Gaddo, 2009).

Yine 2009 yılında Japonya’da, JFE Steel firması tarafından geliştirilen ve liman inşaatı ve tadilatında kullanıma uygun Ferroform isimli cüruf bazlı çimento betonu bloklar geliştirildiği rapor edilmiştir. Bu

bloklar agrega olarak kullanılan EAO cürufu ve çimento karışımından oluşmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 2.6’da bir liman alanında EAO cürufunun agrega olarak kullanımı ile oluşturulmuş çimento betonu blokların kullanımına örnekler görülmektedir. Ferroform’un geleneksel çimento betonundan daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gibi çevresindeki deniz habitatına da herhangi bir olumsuz etkisi tespit edilememiştir (Matsunaga, Tanishiki, & Tsuzimoto, 2009; TOBB, 2012).



Şekil 2.6: Japonya’da EAF Cürufunun Limanda Agrega Olarak Kullanımı

Dünyada (özellikle Japonya’da) EAO cüruflarının diğer önemli bir kullanım alanı da yine deniz veya su akış kenarlarında oluşan erozyonun önlenmesine yönelik uygulamalardır. Şekil2.7’de kıyı erozyon uygulamasında EAO cüruflarının kullanım örneği verilmiştir. Özellikle Japonya’da kıyı kenarlarında aşınma erozyonuna karşı, su kanallarının yapımı, kıyı güçlendirme, deniz duvarı vb. uygulamalarda EAO cüruflarının kullanımı çok yaygındır (Karpuzcu, 2012; TechnoBee, 2012).



Şekil 2.7: Japonya Mizushima limanında Ferroform kullanılarak yapılan deniz duvarları.

Çimento Üretiminde Cüruf Kullanımı

ABD Portland Çimento Birliği'nin Temmuz 2005'de yayımladığı "Demir Çelik Yan Ürünleri" ile ilgili bilgi notunda döküm kumu, tufal ve cürufun çimento üretiminde kullanımının yaygın olduğu belirtilmiştir. ABD'de BOF ve EAO yan ürünü olan çelik cürufu, çimento üretiminde kullanılmaktadır. Çelik cürufu hava ile soğutulur, serbest demir ürünleri ayrıldıktan sonra klinker üretiminde ham madde olarak kullanılabilir. 2003 yılında ABD'de yapılan bir araştırmada, 8,8 Mt çelik cürufu olduğu ve bunun %5'den fazlasının çimento tesislerinde klinker üretimi için kullanıldığı belirtilmektedir. 2005 yılında 39 portland çimento tesisi klinker üretiminde cürufu ham madde olarak kullanmış ve 11 tesis de bir ya da daha fazla çimento ürününe cürufu ilave etmiştir (PCA, 2005). Portland çimento üretiminde çelik cürufu kullanımı, klinker üretim kapasitesini arttırırken aynı zamanda CO₂ emisyonunu da azaltmaktadır. Uygun oranlarda çelik cürufu kullanımı; çimento ham karışım dizaynındaki kil, boksit, hadde tufali, kum, uçucu kül, şeyl gibi öğelerin kullanımını azaltabilir ya da bir kısmının yerine geçebilir (NSA, 2013).

Dünyada Kanada, ABD, Avustralya, Çin ve Hindistan gibi ülkelerde çelikhane cürufu katkılı çimento üretiminin gerçekleştirildiği, bu üretimin ABD'de CemStarSM prosesi adı altında patentlendiği görülmektedir. CemStarSM prosesi, 1990'lı yıllarda Amerika'da çimento, hafif ve ağır agrega, briket, beton ve çelik üretimi yapan Texas Industries, Inc. (TXI) şirketi tarafından çimento üretimi ve üretim esnasında açığa çıkan emisyonların azaltılması ile ilgili problemlerin çözülmesi amacıyla başlatılmış çalışmalar sonucu geliştirilmiş yenilikçi bir teknolojidir. Birçok farklı tesiste yapılan incelemeler sonucunda 1994 yılında hayata geçirilen teknoloji, döner fırın girişine klinker hammaddesi ile birlikte belirli oranda çelikhane cürufunun ilave edilmesiyle klinker üretilmesi prosesini kapsamaktadır. Araştırmalara çimento fabrikası araştırma laboratuvarlarında başlanmış ve uzun süre üzerinde çalışıldıktan sonra proses endüstriyel ölçekli çimento üretim tesislerinde test edilmiştir. Başarılı sonuçlar alınması üzerine 1995 ve 1996 yıllarında Amerika Patent Enstitüsü'ne başvurularak CemStarSM prosesi ile ilgili 2 adet patent alınmıştır (NSA, 2001).

Prosesin geliştirilmesine devam edilmekte ve Amerika dışından da patentler alınmaktadır. CemStarSM prosesi ile sağlanan faydalar aşağıda verilmiştir:

- Üretim artışı: Klinker üretimi % 5-15 oranında artmıştır.
- Yakıt tasarrufu: Üretimde ton başına karşılık gelen artışa rağmen yakıt tüketiminde artma olmamış veya çok az olmuştur.
- Emisyonun düşmesi: CemStarSM prosesi CO₂ ve NO_x emisyonlarını belirgin oranda düşürmektedir.
- Hammadde yararları: Prosesin kullanımıyla şeyl ve kil gibi istenmeyen hammaddelerin kullanımı ortadan kalkmıştır. Bu da istenmeyen sülfür, alkali ve nemin ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Cüruf kullanımı ayrıca demir cevherinin kullanıma zorunluluğunu da ortadan kaldırmaktadır.
- Ürün esnekliği: Çimento fabrikaları farklı tiplerde demir içeren çimento ürettiğinden, cüruf farklı Triksiyumalüminat (C3A) ürünleri için uygun ham karışım ayarlarında kullanılabilir.
- Uygulamaya geçişte minimum zaman ve para kaybı: Prosesin uygulanması tipik olarak fırın başına 300.000 \$'lık bir yatırımı gerektirmektedir ve prosesin uygulamaya sokulma süresi 2-3 aydır (Caijun ve Jueshi, 1999).

Kanada’da yapılan araştırmalar neticesinde;

- Cürufun portland çimentosuna karıştırılabilmesi için proses şartlarının malzemenin hidrolik özelliğini arttırıcı yönde planlanması gerekmektedir.
- Proseste yapılacak ilk ayarlama FeO’in Fe₂O₃’e oksitlendirilmesidir. Bunun ötesinde cürufun portland çimentosunun ana fazı olan amorf faz içermesi için, su ile soğutulması gerekmektedir. Cüruf içerisindeki yüksek kirecin silikaya oranı cam-camsı faz oluşumunu engellese de, su ile soğutmanın hızı ayarlandığında çekirdeklenme kristal gelişimi meydana gelebilir.
- Erimiş cüruftaki demirin oksitlenmesiyle iki değerli demirden üç değerli demire geçiş, cürufun çimentolama özelliklerini arttırmaktadır. Oksitleme aşamasında yapıdaki wüstite fazı da azalmaktadır.
- Granüle cürufta üç değerli demir, ferrit mineraline dönmeye fırsat bulamadan amorf faza dönüşerek katılaşmaktadır. Yani oksidasyon sonucu erimiş cüruf içerisindeki üç değerli demir miktarı ve cürufun cam yapıcı özelliği artmaktadır.
- Katı cürufun, en son sahip olacağı kristal yapı üzerinde soğutma hızının etkisi büyüktür. X-ışını analizlerine göre, kontrol edilebilir soğutma hızıyla, cürufun yapısında çimento yapıcı ana fazların miktarı arttırılabilir.
- Sıvı cürufun hızlı soğutulmasıyla, cüruf içerisindeki çimentolama potansiyeli yüksek camsı faz oluşturulabilir. Oksidasyon ve granülasyonun birlikte yapılmasıyla uygun hidrolik özelliklere sahip ve kolay öğütülebilen camsı yapıdaki katı elde edilebilir.
- 35 günlük hidratasyon periyodu sonucunda, %10 cüruf katılmış portland çimentosunun mukavemet değerlerinde artma saptanmıştır. Mukavemet değerlerindeki bu artma, hidrate cürufu, portland çimentosu arasındaki sinerjik etkiden dolayı meydana gelmektedir.

Çelikhane cürufu katkılı çimento için tespit edilmiş olan uygulama alanları ise aşağıda sıralanmıştır:

- İnşaat mühendisliği uygulamaları
- Endüstriyel bina uygulamaları
- Baraj yapımı uygulamaları
- Yol yapımı uygulamaları

Yapılan araştırmalara göre, çelikhane cürufu katkılı çimentonun geleneksel çimentodan farklı özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- İlerleyen süreyle birlikte yüksek mukavemet: Geleneksel çimentoya göre, çelik cüruf çimentosunun mukavemeti ilerleyen zamanda hızlı bir şekilde artar. Tablo 2.4’te çelik cüruf çimentosunun mukavemetinin zamanla artması verilmiştir.

Tablo 2.4: Çelik cüruf çimentosunun zamana bağlı olarak mukavemeti

Zaman	7 gün	28 gün	60 gün	3 ay	6 ay	1 yıl	5,5 yıl	10 yıl
Basma Mukavemeti(MPa)	21,9	47,5	50,5	63,0	66,9	78,9	90,8	115,6
% Artma oranı	46,1	100	106	133	141	156	191	243

- Düşük sıcaklıkta hidrasyon: Çelik cüruf çimentosunun hidrasyon ısı baraj inşaatları için portland çimentosu, geleneksel çimento ve yüksek fırın cüruf çimentosundan daha düşüktür. Sonuçlar Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5: Değişik sürelerde maksimum hidrasyon ısı

Grade Boyut	Çelik cüruf çimentosu		Orta hidrasyon ısı çimentosu		Düşük hidrasyon ısı BF çimentosu	
	3 gün	7 gün	3 gün	7 gün	3 gün	7 gün
325	146	171	251	293	197	230
425	130	183	-	-	188	230

- İyi aşınma direnci: Çelik cürufu, klinkere göre daha fazla demir ve manganez içerir. Bu yüzden çelik cüruf çimentosu geleneksel çimentoya göre daha iyi aşınma direncine sahiptir. Yüksek fırın cürufuyla çelik cürufunun aşınma dirençlerinin karşılaştırılması Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6: Aşınma oranı (%)

Grade	Çelik cüruf çimentosu	Yüksek fırın çimentosu
325	3,05	3,44
425	1,77	2,65

- İyi geçirgenlik: Çelik cürufunun geçirgenliği mükemmeldir. 3 MPa'a kadar su basıncında, C20 sınıfı çelik cüruf betonunda geçirgenlik sıfırdır.
- Mikro genleşme: Tablo 2.7'de çimentonun çeşitli sürelerde genleşme oranını (%) göstermektedir.

Tablo 2.7: Çelik cüruf çimentosunda % genleşme oranları

Grade	7 gün	14 gün	21 gün	28 gün	2 ay	3 ay
Çelik cüruf çimentosu	+0,0860	+0,1224	+0,1228	+0,1236	+0,1230	+0,1224
Yüksek fırın cürufu	-0,0064	-0,1039	-0,1120	-0,1190	-0,2260	-0,2750

- İyi donma ve korozyon dayanımı: -15 ile -20°C sıcaklık arasında 100 sefer tekrarlanarak yapılan donma testinde çelik cürufunun mukavemetinde değişim olmamıştır. Deniz suyuna batırıldığında da yüzeyde bozulma olmayıp, %1'lik H₂SO₄ ve %20 NaOH ve sülfat solüsyonunun 1 yıl kullanılması sonucunda dahi, mukavemette artış gözlenmiştir. Mukavemet CO₂'nin etkisiyle gelişmektedir (Caijun ve Jueshi, 1999).

Çimento deneyleri kapsamında, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği ARGE Enstitüsü Laboratuvarlarında deneyler yapılmıştır. Yapılan ön deneyler ile %20 çelikhane cürufu + %80 portland çimento karışımında hacim genişmesinin standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir (İTÜ TechnoBee, 2012).

Çin'de ana malzemesi çelik cürufu, yüksek fırın cürufu ve Portland çimento olan çelik cürufu çimentosu adlı bir çimento çeşidinin bulunduğu ve Çin'deki toplam çelik cürufu üretiminin yaklaşık %40'ının 20 yıldan fazla süredir bu çimentonun üretiminde kullanıldığı belirtilmektedir. Çin Ulusal Standardına (GB 13590-92) göre üretilen bu özel çimento; %30 çelik cürufu, %30 granüle yüksek fırın cürufu, %35 portland çimento ve %5 gypsum (alçı taşı) içerir. Çelik cürufunun çimento üretiminde kullanımına dair GB/T 12957-05 Çin Ulusal Standardı dışında küresel bir standart yoktur. Bu özel çimentonun, Portland çimentoya göre avantajları; düşük enerji maliyeti, aşınmaya dayanıklılık, düşük hidratasyon ısısı gelişimi, geç dayanım gelişimi ve daha iyi sülfat direnci iken uzun priz süresi ve düşük erken dayanım dezavantajlarıdır. Çin'de genel inşaat uygulamalarında özellikle kütle beton ve kaldırım/yol kaplaması uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Alanyalı, Çöl, Yılmaz, Karagöz, 2009).

Alanyalı, Çöl, Yılmaz ve Karagöz, 2009 yılında yaptıkları çalışmada BOF Cürufu ilavesi ile Portland çimento üretimini araştırmıştır. Bu çalışmada Kardemir'den alınan hava ile soğutulmuş BOF cürufu, döner sürücülü manyetik seperatörden geçmiş ve klinker katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için manyetik bileşenlerden ayrılmıştır. İki farklı tane boyutlu manyetik olmayan cüruf kütlece %20-30 oranlarında Portland çimentoya eklenmiş ve bu betonların basınç dayanım değerleri Çin Ulusal Standardında (GB13590-92) belirtilmiş Grade-325 ve Grade-425 çelik cürufu çimentolara uygundur. Cüruf kullanımı ile betondaki çatlama riski azaltılır. Bu çalışma; manyetik separasyondan geçerek modifiye edilmiş BOF cürufunun, Portland çimento üretiminde katkı olarak kullanılabileceğini doğrular.

Özkan tarafından 2006 yılında yapılan çalışmada Erdemir'den temin edilen Çelikhane Cürufu (ÇÇ) ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GYFC) ayrı ayrı ve birlikte farklı oranlarda karışma katılarak 22 farklı kombinasyonda çimento elde edilmiş ve %50 GYFC ve %50 GYFC-ÇÇ katkılı harç ve betonların en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Özellikle sülfatlara ve yüksek sıcaklığa Portland çimentosuna göre daha dayanıklıdır. Çimento üzerindeki etkileri açısından; incelik, özgül ağırlık, hacim sabitliği, priz süreleri, basınç ve eğilme dayanımı, sülfatlara ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyleri, beton üzerindeki etkileri açısından ise; 7, 28, 90 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuç olarak;

- GYFC ve ÇÇ birlikte ve ayrı ayrı kullanıldıklarında priz süreleri gecikmiştir. Cüruflar geç reaksiyona girmektedir.
- GYFC, harç yaşı arttıkça çimentolara daha fazla dayanım kazandırmaktadır. ÇÇ, diğer katkıların aksine harç yaşı arttıkça dayanım kaybını artırmaktadır. Beton basınç dayanımları daha çok numuneleri ile benzer özellikler gösterir.
- GYFC ve ÇÇ sülfatlara daha dayanıklıdır.

- %50 karışimli çimentolar 800oC sıcaklığa diğer gruplara göre daha dayanıklıdır.
- GYFC karışimli çimento gruplarında, %50 katkı miktarı en iyi sonucu vermiştir.
- GYFC ve ÇÇ'nin birlikte kullanıldığı çimento gruplarında, %50 katkı miktarı en iyi sonucu vermiştir.

ÇÇ ve GYFC'nin birlikte çimento sanayinde kullanılabileceği görülmüş ve bu cüruflar daha ince öğütüldüğünde %70 miktarına kadar klinker ile yer değiştirerek sülfatlara ve yangın direncine daha dayanıklı çimentolar üretilebilir.

Tsakiridis, Papadimitriou, Tsivilis ve Koroneos tarafından 2008 yılında Atina Ulusal Teknik Üniversitesinde "Portland çimento klinkeri üretiminde çelik cürufunun kullanımına" ilişkin yapılan çalışmada Portland çimento klinkeri üretimi için iki farin hazırlanmış ve üretilen laboratuvar ölçekli çimentoların kimyasal ve mineralojik analizleri yapılmıştır. Bir farin (referans) olağan ham maddelerle hazırlanırken, diğeri %10,5 çelik cürufu eklenerek hazırlanmış. Çelik cürufunda C3S, C2S, C4AF ve C2F'nin varlığı cürufun çimentoya benzer özelliklerini destekler. CaO, Fe₂O₃, SiO₂, MgO ve Al₂O₃ çelik cürufunun ana içeriğini oluşturup, bu kimyasal kompozisyon Portland çimentoya benzerdir. Temel fark, çelik cürufun yüksek oranda demir (2,3) oksit içermesidir. Bu çalışmada hazırlanan ham madde kompozisyonlarında, çoğunlukla kireçtaşına ikame olarak çelik cürufu kullanılmış. 0-5 mm fraksiyonda çeneli kırıcı ile öğütülmüş çelik cürufu; kireçtaşı, kil, kum, boksit (alüminyum taşı) gibi diğer ham maddelerle uygun oranlarda karıştırılarak farin (ham madde karışımı) hazırlanmıştır. Sonuç olarak; %10,5 oranında çelik cürufu farin, Portland çimento üretimindeki sinterleme ve hidrasyon proseslerini etkilememektedir. İki klinker de öğütülebilirlik, priz süresi, basınç direnci, sağlamlık açısından test edilmiş. Hidrasyon ürünleri XRD analizi ile 2, 7, 28, 90 gün için incelenmiş. Fiziko-mekanik test sonuçları göstermektedir ki; çelik cüruf ilavesi, üretilen çimentonun kalitesini negatif olarak etkilememektedir. Çelik cüruf kullanımı, standart kıvam için su içeriğini ve priz süresini kısmen etkilemektedir.

Iacobescu, Koumpouri, Pontikes, Şaban, Angelopoulos tarafından, 2011 yılında Sovel S.A'dan alınan EAO Cürufu ve Titan Çimento S.A'dan alınan kireçtaşı ve kil ile Belite (Yeşil) çimento üretimi ve karakterizasyonu incelenmiş. Referans olarak saf Belite çimento ve %5, %10 oranlarında EAO Cürufu eklenmiş çimentolar EN 196-1 standardına göre test edilerek araştırılmış. Belite çimento Yeşil çimento olarak da adlandırılır ve standart Portland çimentoya göre düşük ateşleme ısısı sayesinde daha düşük enerji tüketimi ile CO₂ emisyonunu azaltır. Sonuçta, standart Portland çimentoya göre daha düşük sıcaklıkta (1380°C) EAO Cürufu Belite çimentolar başarıyla üretilmiştir. İlk günler için basınç dayanım sonuçları, EAO Cürufu arttıkça azalmaktadır. Hızlı soğuma oranına rağmen, cürufların düşük alkalitesi, yüksek demir oksit (hematit) içeriği ve belite mineralin düşük aktivitesi nedeniyle basınç dayanımları azalmıştır. Referans çimentoya göre, cürufu çimentoların ikisi de (%5, %10) düşük erken basınç dayanımına sahip olduğundan; EAO Cürufu çimento yüksek erken (ilk) dayanım gerektirmeyen yerler gibi spesifik alanlarda kullanılabilir.

Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı

EAO ve pota cüruflarının dolgu malzemesi olarak direkt kullanımı bu tür endüstriyel çıktıların değerlendirilmesinde ilk akla gelebilecek yöntemdir. Ancak bu yöntemin uygunluğu diğer kullanım alanlarına oranla daha az araştırılmıştır. Bu konuda yapılmış olan detaylı çalışmalardan bir tanesi Andreas ve arkadaşları tarafından 2005 yılında İsveç'te yürütülmüştür. Avrupa Birliği yönetmeliklerine paralel olarak İsveç'te yaklaşık 2000 hektarlık dolgu yapılarak kapatılması gereken arazi

bulunmaktadır. Andreas ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışma ile İsveç'in Hagfors şehrinde dolgu yapılacak 5000 m²'lik arazi için öngörü çalışmalarında bulunulmuştur. Çalışmada doğal kaynaklar yerine EAO ve pota cüruflarının kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır.

Çalışmanın sonuçlarından, neredeyse tüm EAO cüruf türlerinin ve EAF cürufları ile karıştırılmış halde pota cüruflarının en üstte bulunan bitki örtüsü katmanı hariç kullanılmasının uygunluğu tespit edilmiştir (Andreas, Herrmann, Lidström, & Lagerkvist, 2005).

Gübre Üretiminde Kullanımı

Pota cürufu yeteri miktarda CaO ve MgO ihtiva eder ise asitli toprakta toprağın doğal asitliğini azaltması amacıyla kullanılmaktadır. Cüruftaki çeşitli minareler, toprağı tarımsal açıdan daha kullanışlı yaparlar ve toprağı dağılırlar. Avrupa da BOF cürufu büyük ölçüde bu özellikte kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda cürufun % 20'sini gübre olarak değerlendirilmektedir (İTÜ TechnoBee, 2012).

Mersin Üniversitesi tarafından yürütülen proje kapsamında "çelikhane cürufu ve haddehane tufalinden Fe ve diğer bitki besin elementlerinin geri kazanımı ve bu elementlerin bitki büyümesine etkisi" araştırılmıştır. Türkiye'nin değişik bölgelerinden toplanan çok sayıda toprak örneğinde yapılan analizlere göre demir eksikliği % 27'lik bir oranla çinkodan sonra en yaygın olan mikro element eksikliği sorunudur. Türkiye'nin bitkisel üretim amaçlı kullanılabilir alanının yaklaşık 7.5 milyon hektarında demir eksikliğinin olabileceği belirtilmektedir. Bu çalışmada, EAO cürufu, ızgara altı cürufu ve tufal örneklerinin elemental analizleri yapılmış ve demir içeriği daha yüksek olan ızgara altı cürufu ile hazırlanan demirli gübre çözeltisi mısır bitkisine uygulanmış. Toksik düzeyde element içermeyen cüruftan elde edilen çözeltinin demir iyonunun yanında B (berilyum), Mg (magnezyum), P (fosfat), K (potasyum), Ca (kalsiyum), V (vanadyum) gibi bitkiler için mutlak gerekli besin maddelerini de içermektedir. Toplam sekiz hafta süreyle yetiştirilen mısır bitkisinde Fe dozu arttıkça kuru madde miktarında, klorofil içeriğinde ve Fe alımında artış elde edildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak; hem tarım topraklarında demir eksikliğinin giderilmesi hem de ekonomik olarak büyük kayıplara sebep olan cüruf ve tufalin ekonomiye kazandırılması ile genellikle yurt dışından ithal edilen gübre ihtiyacı da önlenmektedir (Demir, A., Yıldırım, D., Köleli, N., 2014).

Grit Üretiminde Kullanımı

Grit, malzeme yüzeylerin temizlenmesinde kullanılan geleneksel yöntem, basınçlı hava ve aşındırıcı partikül (grit) karışımının püskürtüldüğü kum raspasıdır. Kum raspası, boya öncesi çelik konstrüksiyonların ve tersanelerde yeni yapılan ya da bakımdaki gemi gövde yüzeylerinin boya ve korozyon ürünlerinden temizlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Cüruf esaslı gritler ucuz olmaları nedeniyle, gemi inşa sektörü, tamir bakım tersaneleri ve sualtı tanklarının temizlenmesinde endüstriyel kullanıma sahiptir. Bir gemi bakımı için cüruf kullanımı 800-1000 ton/yıldır. Ülkemizde kullanılmakta olan grit 30-140 \$/ton bedelle yurtdışından ithal edilmektedir (İTÜ TechnoBee, 2012).

Biyooksidasyon Prosesi pH Dengeleyicisi Olarak Kullanımı

Cevherlerden/birincil kaynaklardan altın üretiminde kullanılan siyanür liçi prosesinde altın kazanım verimleri %85'in altında olan altın cevherleri refrakter altın cevherleri olarak isimlendirilmektedir. Bu tür cevherlerin siyanür liçi ile işlenmesinde refrakterlik özelliğine sebep olabilecek etkenler değişken olabilmesine rağmen baskın refrakterlik özelliği altın içeren sülfürlü cevherlerde görülmektedir (Turan, 2009).

Öğütme ile serbestleşebilen türdeki altın cevherlerinin oluşturduğu maden yataklarının giderek azalması sebebi ile sülfürlü refrakter cevherlerden yapılan altın üretimi toplam üretimin 1/3'ünü oluşturmakta ve giderek artmaktadır. Sülfürlü altın cevherlerinin kükürt içeriğinin, refrakterlik özelliğinin ortadan kaldırılması ve submikron altın tanelerinin tane serbestleşmesinin sağlanabilmesi için uzaklaştırılması bir zorunluluktur. Bu yüzden sülfürlü cevherler siyanür liçi öncesinde bir ön işleme tabi tutulmalıdır. Kükürt uzaklaştırmada kullanılan temel yöntemler oksitleyici kavurma, basınç altında oksidasyon, kimyasal oksidasyon ve biyooksidasyondur. Biyooksidasyon, atmosferik kirlilik yaratmaması, yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışacak teçhizata ihtiyaç duyulmaması, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşüklüğü ve basit tesis dizaynlarından dolayı diğer konvansiyonel yöntemlere kıyasla öne çıkan ve uygulaması dünya çapında artan bir prodestir. Temel prensip olarak biyooksidasyonda oksitlenmek istenen cevher bakteriler ile muamele edilmekte ve cevherin yapısındaki sülfürlü bileşikler oksitlenmektedir (Çelik, 2005).

Biyooksidasyon prosesi asit üreten bir prodestir ve çalışma pH'ı 1-2 arasında tutulmalıdır. Bu yüzden proses süresince kalsit, sönmüş kireç ya da dolomit gibi pH dengeleyici katkıları kullanılmaktadır. Sandström ve arkadaşlarının İsveç'te yaptığı çalışmalar göstermektedir ki bir biyooksidasyon tesisinin çalışma maliyetinin neredeyse %30'una eşit olan dolomit ya da sönmüş kireç pH dengeleyici-nötralizatörler yerine EAF veya pota cürufalarının kullanımı iyi bir alternatiftir. Çalışmalarının sonuçlarına göre bir biyooksidasyon tesisinde, işlenen 1 ton cevher başına, 110 kg sönmüş kireç yerine, 152 kg pota cürufu ya da 267 kg EAO cürufu kullanılabilir. Ancak pota cürufunun bu amaçla kullanımının daha uygun olduğu çalışmanın bir çıktısı olarak belirtilmiştir (Gahan, Sundkyist, Engström, & Sandström, 2011).

Refrakter Üretiminde Kullanımı

Ducman ve Mladenovic tarafından yürütölen bir çalışma ile EAO cüruflarındaki vüstit yapısının 700-800 °C aralığında magnetite dönüştüğü ve bu dönüşümün tek yönlü olduğu belirlenmiştir. Çalışma ile bu cürufaların vüstit magnetit dönüşümünden sonra refrakter malzeme olarak 1000 °C sıcaklıklara kadar kullanımının mümkün olduğu rapor edilmiştir (Okochi & Mcmartin, 2011; İTÜ TechnoBee, 2012).

Cürufaların Çevre Yatırımlarında Kullanımı

Demir çelik üretiminden kaynaklanan cürufaların katı atık bertaraf tesisleri atıksu arıtma tesisleri gibi çevre yatırımları alanında başka kullanımları da bulunmaktadır. Bu yönüyle cürufalar atık olmaktan çıkarılmakta, doğal kaynak kullanımı azaltılmakta ve çevre yatırımlarına destek sağlanmaktadır.

Çelik üretimi cürufunun, atık düzenli depolama sahalarında üst örtü olarak kullanımı konusunda da çalışmalar bulunmaktadır. İsveç'te yapılan bir çalışmada kapatılacak düzenli depolama sahaları için yüklü miktarda mineral malzemeye ihtiyaç duyulduğu, bunun doğal kaynaklardan karşılanmasının oldukça maliyetli olduğu yaklaşımla EAO ve pota cürufalarının depolama örtüsü için uygunluğu araştırılmıştır. 4 farklı kaynaktan EAO cürufaları ile pota cürufalarının kullanım olanakları incelenmiştir. Buna göre farklı tanecik boyutlarına sahip bu cürufalar için 16/32 mm aralığındaki cürufaların drenaj katmanlarında, daha ince cürufaların ise geçirimsiz katmanda kullanılabilecekleri belirlenmiştir. Bu çalışma cürufaların çevre yatırımlarında da yararlı kullanım imkanları olduğunu göstermektedir (Andreas, Herrmann, Lidström, & Lagerkvist, 2005).

Cürufların Atıksu Arıtımında Kullanımına yönelik özellikle evsel atıksularda biyolojik arıtım sonrası atıksuların cürufla dolu bir tanktan geçirilmesi yoluyla fosfat giderimi uygulamaları bulunmaktadır. Okochi ve McMartin tarafından yürütülen bir çalışma ile EAF cüruflarının sel sularındaki P tutucu etkisinden bahsedilmiş ancak çalışmanın hala devam eden ve mekanizması araştırılan bir konu olduğu da belirtilmiştir. Endüstriyel atıksulardan krom gideriminde ön arıtım aşaması olarak kullanılmaktadır. Yağmur suyundaki katı madde içeriğini filtrelemek amacıyla kullanılabilir (Ochola, 2009).

Cürufun; terkedilmiş ve asitli muameleye uğramış maden sahalarında iyileştirici malzeme olarak kullanılması, deniz ortamında tabanda biriken ve ötrofikasyona neden olabilecek çamurun arıtılması amacıyla kullanılması ve karbondioksitin tutulmasıyla ilgili teknolojilerde kullanılabilmesi diğer çevresel faaliyetlerde kullanımına örneklerdir (Ochola, 2009).

Uibu ve arkadaşları tarafından, 2011 yılında İsveç-Estonya ortaklığı ile gerçekleştirilen bir çalışmanın sonuçlarında EAO cüruflarının CO₂-sorbent olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir. Fosil yakıtların sebep olduğu CO₂ emisyonlarının düşürülmesi amacı ile çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışma ile EAO cüruflarının Mg ve Ca içeriklerinden dolayı sıvı fazda mineral karbonizasyonuna uygun oldukları ve CO₂ emisyonlarının azaltılması amacı ile CO₂-tutucu (sorbent) olarak kullanılabilirlikleri belirlenmiştir (İTÜ TechnoBee, 2012).

KAYNAKÇA

- Alanyalı, H., Çöl, M., Yılmaz, M., Karagöz, Ş. (2009). "Concrete Produced by Steel-Making Slag (Basic Oxygen Furnace) Addition in Portland Cement". *Int. J. Applied Ceramic Technology*, 6, 736-748.
- Alataş, T., Somunkıran, E. T., Ahmedzade, P. (2006). "Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agregası Olarak Kullanılması". *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 225-234.
- Andreas, L., Herrmann, I., Lidström, M., & Lagerkvist, A. (2005). "Physical Properties of Steel Slag to be Reused in a Landfill Cover". *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia / Italy: Environmental Sanitary Engineering Centre.*
- ASA. (2002). "A Guide to the Use of Iron and Steel Slag in Roads". *Australasian (Iron & Steel) Slag Association.*
- ASA. (2013). "Roads Guide Supplement on General Applications". *Quick Reference Guide 1.*
- ASA. (2014). "Steel Furnace Slag". *Quick Reference Guide 3.*
- Caijun S., Jueshi Q. (1999). "High Performance Cementing Materials From Industrial Slags - A Review".
- Commission of the European Communities. (2007). "Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Interpretative Communication on waste and by-products" (COM(2007) 59 final, Brussels 21.02.2007).
- Çelik, H. (2005). "Biyooksidasyon Prosesi". *Cilt: 44, Sayı: 3, 35-46.*
- Danieli Environment. (2010). "ECOGRAVEL Process EAF – BOF – LADLE Slag Recovery".
- Demir, A., Yıldırım, D., Köleli, N. (2014). "Çelikhane Cürufundan ve Tufalından Bitki Besin Elementlerinin Geri Kazanımı ve Bu Elementlerin Bitki Büyümesine Etkisi". *ISITES2014.*
- Euroslag. (2006). "Legal Status of Slags Position Paper". *Duisburg / Germany: The European Slag Association.*
- Euroslag. (2012). "Position Paper on the Status of Ferrous Slag complying with the Waste Framework Directive (Article 5/6) and the REACH Regulation".
- Euroslag. (2014). "Statistics 2012". Kasım 2015 tarihinde Euroslag: <http://www.euroslag.com/products/statistics/2012/> adresinden alındı.
- FEhS. (2008). "Slag: A Sound Choice in Favour of Ecology". *Institut für Baustoff Forschung.*
- FHWA. (2012). "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". Kasım 2015 tarihinde FHWA, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssa2.cfm> adresinden alındı.
- Gahan, C. S., Sundkyist, J. E., Engström, F., & Sandström, A. (2011). "Conservation and Recycling". *Resources*, 541-547.

Iacobescu, R.I., Koumpouri, D., Pontikes, Y., Şaban, R., Angelopoulos, G. (2011). "Utilization of EAF Metallurgical Slag in "Green" Belite Cement". U.P.B. Sci. Bull., Seri B, 73, 187-194.

İTÜ TechnoBee. (2012). "Elektrikli Ark Fırınli Çelik Tesislerinde Üretilen Çelik Cürufunun Dolgu, Temel ve Alt Temel Olarak Kullanımına İlişkin Teknik Rapor Ek-A".

Karpuzcu, M. (2012). "Çelikhane Cüruflarının Geri Kazanımı". TOBB Türkiye Demir Demir-dışı Metaller Meclisi Teknik Raporu.

Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., & Gonzalez, J. J. (2006). "Cement & Concrete Components".

Matsunaga, H., Tanishiki, K., & Tsuzimoto, K. (2009). "Environment-Friendly Block, "Ferroform" Made from Steel Slag". JFE Techincal Report. 53-57.

NSA. (1992). "Properties and Uses of Iron and Steel Slags". National Slag Association.

NSA. (2001). "CemStarSM Process: Slag Usage Raises Productivity, Operational Efficiency, Lowers Emissions, CemStar Technical Bulletin". NSA 201-1.

NSA. (2003). "Iron and Steel Making Slag Environmentally Responsible Construction Aggregates".

NSA. (2013). "Steel Slag: A Premier Construction Aggregate". Steel Furnace Brochure.

Ochola, C. (2009). "Utilizing Iron and Steel Slag's in Environmental Applications-An Overview". Tube City.

Okochi, N. C., & Mccartin, D. W. (2011). Journal of Hazardous Materials, 250-257.

Özkan, Ö. (2006). "Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri". İMO Teknik Dergi, 3893-3902.

Pasetto, M., & Baldo, N. (2011). "Construction and Building Materials". 3458-3468.

PCA. (2005). "Iron and Steel Byproducts". Portland Cement Association Sustainable Manufacturing Fact Sheet".

Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). "Cement & Composite Concretes". 663-671.

Sasaki, T. (2015). "Standardization of Iron and Steel Slag Products". Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No:109. 189-194.

TOBB Demir Demir-dışı Metaller Sektör Meclisi ve Türkiye Demir Çelik Üreticileri Derneği. (2012). "Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği ve Çelikhane Cüruflarının Geri Kazanımı, Geçici Depolanması ve Değerlendirilmesi ile ilgili Rapor".

Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C. (2008). "Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production". J. Hazardous Materials 152. 805-811.

Turan, A. (2009). "Keban Yöresi Piritik Refrakter Altın Cevherlerinin Ateş Analizi Optimizasyonu". Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İTÜ FBE.

Uibu, M., Kuusik, R., Andreas, L., & Kirsimae, K. (2011). Energy Procedia. 925-932.

Wittayangkoon, S. (2007). "Siam Steel Mill Services Ltd". Global Slag Magazine.

Worldsteel. (2014). "Steel industry by-product".