

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN TÜRKİYE’DE BALASTALTI MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ULUSAL VE ULUSLARARASI ŞARTNAMESLER KAPSAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatih YONAR^{1*}, H. Attila DİKBAŞ²

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale/TÜRKİYE

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Teknokent Genel Müdürlüğü, İstanbul/TÜRKİYE

Öz

Doğal agrega, küresel bazda en çok kullanılan hammadde olarak tanımlanmaktadır. Taş ocaklarının doğal alan tüketimindeki payı ve ekolojik etkileri nedenleriyle geri dönüşüm, yeniden değerlendirme ve yapay agrega kullanımı ile doğal agreganın küresel tüketim payının düşürülmesi hedeflenmektedir. Yapay agrega, ısıtma veya diğer işlemleri barındıran bir endüstriyel proses sonucu ortaya çıkan mineral kökenli malzeme olarak tanımlanmaktadır. İnşaat ve yıkım atıkları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, çelikhane cürufu, küresel bazda en çok tercih edilen yapay agregalar olarak tanımlanmaktadır. 2020 yılı istatistiklerine göre Türkiye, yıllık 35,8 milyon ton ham çelik üretimi ile dünyanın en büyük yedinci, Avrupa’nın ise en büyük çelik üreticisi konumundadır. Yıllık üretim istatistikleri dikkate alındığında şu ana kadar Türkiye’de 55 ila 65 milyon ton cürufun çelik üretimi sırasında ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bu malzemenin büyük kısmının bertaraf edildiği ya da tesis içinde depolandığı bilinmektedir. Mevcut çelik üretim miktarı dikkate alındığında ise her yıl yaklaşık 5 milyon ton yeni cürufun ortaya çıkacağı ve bu miktarın artan kapasite ve kapasite kullanım oranı ile her yıl daha da artacağı düşünülmektedir. Bu makale kapsamında; ülkemizde demir-çelik üretiminin gerçekleştirildiği tesislerde ortaya çıkan çelikhane cürufunun, yapay agrega olarak demiryolu hatlarında, balastaltı tabakası imalatında kullanılması yönünde, malzeme özellikleri, mevcut şartnamemiz ve uluslararası şartnameler, literatürden taranarak ülkemizde yapılabilecek düzenlemelere ilişkin öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Balastaltı tabakası, çelikhane cürufu, demiryolu, yapay agrega

Sorumlu Yazar: Fatih YONAR, fatihyonar@comu.edu.tr



EVALUATION OF THE UTILISATION OF STEEL SLAG AS SUBBALLAST MATERIAL IN TURKIYE, IN THE SCOPE OF NATIONAL AND INTERNATIONAL SPECIFICATIONS

Abstract

Due to high consumption rate of natural aggregates worldwide and the possible environmental effects of new quarries, recycling, reuse of materials and artificial aggregates that can be used instead of natural aggregates are evaluated in international examples to reduce resource consumption and environmental impacts. Artificial aggregate is defined as aggregate of mineral origin obtained as a result of an industrial process involving thermal or other applications. The most widely used artificial aggregates in international studies are blast furnace slag, steel slag, fly ash, construction, and demolition waste. According to the statistics of 2020, Türkiye is the seventh largest steel producer in the world and the largest steel producer in Europe with a crude steel production of 35,8 million tons. It is known that 55 to 65 million tons of steel slag has been obtained from iron and steel production in Türkiye. Most of this by-product has been disposed of or kept in storage areas in an inactive state. Approximately 5 million tons of steel slag is obtained each year and this amount is expected to increase by the increasing capacity and the increasing capacity usage ratio. Within the scope of this article, to use steel slag in the construction of subballast layers of railways, the properties of steel slag and international specifications are investigated. Türkiye's current specification and international specifications are compared and suggestions for regulations that can be made in Türkiye have been presented.

Keywords: Subballast layer, steel slag, railway, artificial aggregate

1. Giriş

İktisadi gelişmenin sürdürülebilirlik sınırları içerisinde sağlanması, sürdürülebilir gelişme olarak tanımlanmaktadır. Sürdürülebilir gelişme, iktisadi gelişmeyi ve ekolojiyi birlikte dikkate almakta, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan mevcut ihtiyaçların karşılanmasını desteklemektedir [1].

“Sürdürülebilir Tüketim”, sürdürülebilir kalkınma fikrinin, tüketim alanındaki karşılığı olarak tanımlanmaktadır. Son dönemde, özellikle gelişmiş ülkelerde tüketim düzeyi artan bir eğilim göstermektedir. Artan tüketim eğilimi, doğal kaynakların tükenme olasılığını net bir şekilde ortaya

koymaktadır. Bu durum da tüketimin ekolojik etkilerinin sorgulanmasına neden olmuş ve mevcut tüketim yaklaşımlarının sürdürülebilir tüketim davranışlarına dönüştürülmesinin gerekliliğini zorunlu bir konu haline getirmiştir [1].

Atıkların depolanmasına dair ağır koşulların bulunduğu, büyük miktarda hammadde tüketen-üreten, yüksek kapasiteli sektörler, sürdürülebilirlik araştırmaları kapsamında en çok dikkat çeken sektörlerdir. Ülkelerin kalkınma stratejilerine göre ana üretim sektörleri farklılık gösterebilmektedir. Fakat küresel bazda, hammadde üretiminde taş ocakları, tüketiminde ise inşaat sektörü ilk sırayı almaktadır. Ortalama agrega tüketimi dikkate alındığında, bir okul inşaatı için 2.800ton, bir otel inşaatı için 1.100ton, 1km otoyol inşaatı için 30.000ton, 1km çift hat demiryolu inşaatı için 16.000ton ve bir nükleer güç santrali için 6 ila 12 milyon ton agregaya ihtiyaç duyulmaktadır [2]. İhtiyaç duyulan agrega genelde civardaki taş ocaklarından getirilmektedir. İhtiyaç duyulan agreganın üretilmesi veya ekonomik gereksinimler kapsamında açılan her yeni taş ocağı, ekoloji üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Yüksek miktarda agregaya duyulan ihtiyaç ve taş ocaklarının ekolojik etkileri, uluslararası çalışmalarda, kaynak tüketiminin ve ekolojik etkilerin indirgenebilmesi için geri kazanım, yeniden değerlendirme ve doğal agrega yerine kullanılabilir yapay agrega gibi alternatifler dikkate alınmasına neden olmuştur.

Türkiye’de de doğal kaynakların tüketimini ve ekolojik etkiyi indirgeyebilmek amacıyla uluslararası pek çok örnekte olduğu gibi farklı seçenekler incelenmeye başlamıştır. Sürdürülebilirlik kapsamında agregaların değerlendirilmesine ve alternatif kaynakların kullanımına ilişkin araştırma ve uygulamalar yapılmaktadır. Bununla birlikte ekolojik etki riski nedeniyle bu gibi değerlendirmeler, ülkemizde kısıtlı kalmıştır.

Yapay agrega, ısıtıl veya diğer işlemleri barındıran bir endüstriyel proses sonucu ortaya çıkan mineral kökenli malzeme olarak tanımlanmaktadır. İnşaat ve yıkım atıkları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, çelikhane cürufu, küresel bazda en çok tercih edilen yapay agregalar olarak tanımlanmaktadır [3].

Çelikhane cürufu ve yüksek fırın cürufu, demir-çelik endüstrisinde öncü durumdaki ülkelerde, katkı maddesi ya da yapay agrega olarak inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bununla birlikte çelik üretim yöntemine göre elde edilen bu katkı maddeleri ya da yapay agregalar farklılık

göstermektedir. Çelik üretimi, cevherden ve hurdadan üretim olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Çeliğin ana kaynak olan demir cevherinden üretimi için entegre tesis olarak tanımlanan ve temel olarak yüksek fırın (YF), bazik oksijen fırını (BOF) ve pota fırınından oluşan üç aşamalı bir üretim gerçekleştirilmektedir. Entegre tesislerde ilk aşama olan YF’de demir cevherinin ergitilmesi ile sıvı ham demir ve çimento ile beton endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ortaya çıkmaktadır. İkinci aşamada ise genellikle çelikhane cürufu olarak isimlendirilen ve uluslararası araştırmalarda yapay agrega olarak kullanılan cüruf ortaya çıkmaktadır. Hurdadan üretimde ana enerji kaynağı elektrik olduğu için bu tesisler elektrik ocakları olarak da isimlendirilmektedirler. Elektrik ocakları da kendi içlerinde elektrik ark ocağı (EAO) ve indüksiyon ocağı (İO) olarak iki alt sınıfa ayrılmaktadır. Ana ocak isimleri ile anılan bu tesislerde ikincil metalürjik işlemler, entegre tesislere benzer şekilde pota fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Elektrik ocaklarının ilk aşamasında hurda, sıvı ham çeliğe indirgenmektedir. Bu ilk aşamada ortaya çıkan cüruf da yapay agrega olarak tercih edilen çelikhane cürufudur. Tesislerin üretim aşamalarındaki farklılıklardan dolayı her tesis tipinden ortaya çıkan çelikhane cürufu nispeten farklı özellikler göstermekte ve bu nedenle meydana geldiği ocağın ismi ile anılmaktadır (EAO cürufu, BOF cürufu, İO cürufu) [4].

Çelikhane cürufunun dolgu, temel tabakaları, bitümlü sıcak karışımlar, çimento bileşeni, balast ve balastaltı tabakaları, beton agregası, sıvı suların düzenlenmesi, mineral gübre, drenaj malzemesi ve mineral yün üretimi gibi pek çok alanda kullanılabildiği, uluslararası çalışmalarda ifade edilmektedir [4].

2020 yılı istatistiklerine göre 35,8 milyon ton ham çelik üretimi ile Türkiye, dünyanın en büyük yedinci, Avrupa’nın ise en büyük çelik üreticisi konumundadır [5]. Belirtilen üretimin ¼ kadarı demir cevherinden diğer kısmı ise başlıca bileşeni demir olan, kullanım ömürlerinin sonuna gelmiş hurdadan ve sektörde üretim esnasında oluşan yan ürünlerden elde edilmektedir.

1 ton sıvı ham çelik üretiminde BOF, EAO ya da İO’larda %12 ila %15 arasında çelikhane cürufunun ortaya çıktığı bilinmektedir. Her üç üretim yönteminde de cürufun içine metalik demirin kaçması söz konusu olmaktadır. Bu metalik demir, cürufun inceltilmesi, elenmesi ve manyetik ayırıştırma ile geri kazanılabilmektedir. Arta kalan cüruf ise fabrika depo sahalarında stoklanmakta ya da katı atık sahalarında bertaraf edilmektedir. Çelikhane cürufunun depolanması, fabrika

kullanım alanını daraltmakta, bertaraf edilmesi ise yeni alanların tüketimine neden olmakta ve aynı zamanda üreticinin maliyetlerini arttırmaktadır.

Yıllık üretim istatistikleri dikkate alındığında şu ana kadar Türkiye’de 55 ila 65 milyon ton cürufun çelik üretimi sırasında ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bu malzemenin büyük kısmının bertaraf edildiği ya da tesis içinde depolandığı bilinmektedir. Mevcut çelik üretim miktarı dikkate alındığında ise her yıl yaklaşık 5 milyon ton yeni cürufun ortaya çıkacağı ve bu miktarın artan kapasite ve kapasite kullanım oranı ile her yıl daha da artacağı düşünülmektedir. 2017 Mayıs ayında tamamlanan düzenlemeler ile çelikhane cürufunun karayolu inşaatında granüler tabakalarda kullanımına imkan tanınmıştır. Fakat granüler tabaka imalatına, çoğunlukla yeni güzergahların inşaatında ihtiyaç duyulduğu için çelikhane cürufunun potansiyeli yüksek, alternatif ve özelliklerine uygun yeni kullanım alanlarının tanımlanması, sürdürülebilirlik kapsamında bir zorunluluktur.

Verilen bilgiler ışığında, bu makale kapsamında; ülkemizde demir-çelik üretiminin gerçekleştirildiği tesislerde ortaya çıkan çelikhane cürufunun, yapay agrega olarak demiryolu hatlarında, balastaltı tabakası imalatında kullanılması yönünde, malzeme özellikleri, mevcut şartnamemiz ve uluslararası şartnameler, literatürden taranarak ülkemizde yapılabilecek düzenlemelere ilişkin öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çelikhane cürufu, çelik üretimi esnasında ergimiş çelikteki safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla ortaya çıkan bir yan üründür. Çelikhane cürufu, kompleks silikat ve oksit bileşenlerinden oluşan, ilk ortaya çıktığında viskoz bir akışkan olan ve soğuduğunda sertleşen bir eriyektir [6]. Günümüzde çelik, EAO, İO ve entegre tesislerde (YF+BOF) üretilmektedir. Çeliğin pek çok farklı türüne ihtiyaç duyulmakta ve üretilmektedir. Bu nedenle çelik cürufunun özellikleri de üretilen çelik cinsi ile değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca, üretilen çelik tipine göre konvertöre beslenen kireç ya da dolomit miktarı da değişmektedir. Bu sebeplerle de ortaya çıkan cüruf miktarı ve cürufun içeriği farklılık gösterebilmektedir [6].

Demir ve çelik üretimi esnasında farklı türde cüruflar ortaya çıkmaktadır. Bu farklı tür cüruflar, ocak cürufu, YF cürufu ve pota cürufu olarak isimlendirilmektedir [6]. Çelik üretiminin ilk aşamasında ortaya çıkan cüruf, çelikhane cürufu (ocak cürufu) olarak isimlendirilmektedir. Uluslararası çalışmalarda kullanılan ve bu çalışmada ele alınan yapay agregaların temel kaynağı bu cüruftur.

Entegre tesislerde (YF+BOF), YF ergitme işleminin ardından sıvı demir, hurda da eklenerek BOF'da işlenmektedir. Üretilen ham çelik tonu başına %12-15 oranında BOF cürufu ortaya çıkmaktadır [7].

EAO cürufu, hurdadan elektrik ocakları ile gerçekleştirilen çelik üretiminin ilk alt grubu olan elektrik ark ocaklarında yan ürün olarak meydana gelmektedir. Hurda ve cüruf yapıcılar ocağa yüklenmekte ve ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kireç ya da dolomitik kirecin etkisi ile hurdadaki safsızlıklar, yoğunluk sebebiyle üst yüzeyde CaO ile bir araya gelerek EAO cürufunu oluşturmaktadır. EAO'da 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 120–150 kg (%12–15) EAO çelikhane cürufu oluşmaktadır [7].

Elektrik ocaklarının ikinci alt sınıfı indüksiyon ocaklarıdır. Tesis isminden de öngörülebileceği gibi indüksiyon, karıştırma, ısıtma ve ergitme işlemlerini yerine getirmektedir. Hurda metal, ocağın içinde doğrudan ısıtıcı elemanlar ile temas halinde olmadığından ortam iyi bir şekilde kontrol edilebilmekte ve istenen saflık ve kalitede çelik üretilebilmektedir. İndüksiyon ocaklarında da elektrik ark ocaklarında kullanıldığı gibi hurda demir ve çelik işlenmektedir. İki üretim yaklaşımı arasındaki temel fark; elektrik ark ocaklarında doğrudan elektrodlardaki elektrik akımı ile metal eritilirken, indüksiyon ocağında, bobinde indüklenen akımın eritmeyi sağlamasıdır. Bu doğrultuda indüksiyon ocağı ve elektrik ark ocağı cürufu kimyasal ve fiziksel açıdan benzerlik göstermektedir. Temel olarak çelikhane cürufu, oksit ve silikatların oluşturduğu kompleks bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan üründür. Cüruf, genel olarak tehlikesiz atık konumundadır ve inert atık sınıfına girmektedir. Fiziksel olarak koyu gri ile açık gri renk aralığında, soğutma durumuna göre çok ya da az poroz, köşeli tane şekline ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Cürufun yaklaşık yarısı kalsiyum oksit (CaO) olup, geri kalanı metal oksitlerden ve hurdadaki diğer elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir [7]. Bu oksitler arasında bulunan CaO ve MgO bileşikleri, su ile temasa geçtiklerinde hidrate olarak hacimlerini arttırmaktadırlar. Bu bakımdan çelikhane

cürufunun kullanımında çok dikkat edilmesi gereken iki bileşen olarak tanımlanmaktadır. Cürufun içinde %12 oranına kadar metalik demir-çelik bulunabilmektedir. Cürufun içindeki demir çeliğin minimum enerji harcanarak kırma, eleme ve manyetik ayırıştırma ile büyük oranda geri kazanılması mümkündür [8].

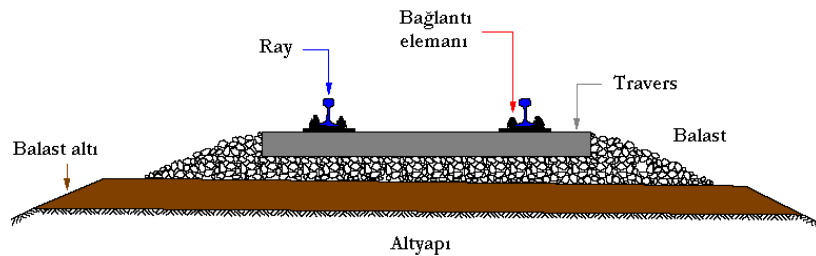
Bu makale kapsamında, entegre tesislerdeki BOF'larında, EAO'larında ve İO'larında, ham çelik üretimi sırasında ortaya çıkan çelikhane cürufunun, yapay agrega olarak demiryolu inşaatlarında balastaltı malzemesi olarak kullanımı irdelenmiştir.

2.2. Metot

Geleneksel bir demiryolu hattı, rayların ve traverslerin meydana getirdikleri “yol çerçevesi” ile, bu çerçevenin altına inşa edilmiş balast, balastaltı adı verilen kırmataş tabakaları ve bunların altındaki “altyapı” adı verilen değişik zemin tabakaları ya da köprü, viyadük, tünel ve benzeri sanat yapılarından oluşmaktadır (Şekil 1). Yol çerçevesi ile balast ve balastaltı tabakaları da “üstyapı” olarak isimlendirilmektedir [9].

“Yol Yatağı Tabakaları”, balast ve balastaltı tabakaları ile bunların altındaki zemin tabakalarından oluşmaktadır. Yol mesnet rijitliği, yol geometrisinin ve drenaj sisteminin korunması açısından yol yatağı tabakaları, özellikleri ve kalınlıkları ile, yol performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [9].

Balast, kırılmış agregadan oluşturulan özel tane dağılımlarında hazırlanan tabaka olarak tanımlanmaktadır. Balast ve altyapı arasında inşa edilen balastaltı tabakası ise temel olarak; rijitliği ayarlayarak yolun taşıma kapasitesini arttırmakta ve yukarıdan iletilen yüklerin altyapıya daha iyi dağılımını sağlamaktadır [9].



Şekil 1. Demiryolu üstyapısı [9].

Yolu ve altyapıyı, trafikten kaynaklanan yüklere karşı korumak, demiryolu taşıtlarının işletme giderlerini, yolcuların güvenliğini ve konforunu kabul edilebilir sınırlarda tutmak için demiryolu yapısal sistemi; trafik ve iklim etkilerine dayanacak şekilde, tasarlanmaktadır [9].

Günden güne artan hareketlilik ile daha hızlı trenlere ve daha yüksek dingil yüklerine talep artarken maliyetlerin de düşürülmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu doğrultuda modern demiryollarının tasarımında, iyi geoteknik ve ekonomik ilkeleri birleştiren akılcı yaklaşımlara ve ayrıca çağımızın zorunluluklarından sürdürülebilirlik ilkesine gerek duyulmaktadır [9].

Bu doğrultuda yakın dönemde demiryolu balastaltı malzemesine ilişkin şartname, 2020 yılında hazırlanmış olan “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”dir.

Fakat belirtildiği üzere sürdürülebilir yaklaşımların dikkate alınabilmesi için doğal agregaya bir alternatif sunulması çağımızın gereklilikleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda, durabil ve mukavim olan çelikhane cürufunun, gerek yıllık 5 milyon tonluk kapasitesi gerekse çelik üreticilerinin olası demiryolu güzergâhları kabul edilen denize kıyı organize sanayi bölgelerinde bulunması nedeniyle çelikhane cürufunun, demiryolu inşaatında balastaltı malzemesi olarak kullanım olanaklarına ilişkin araştırma ve incelemelerin yapılması, sürdürülebilirlik, ekonomi ve sınırlı doğal kaynakların korunumu açısından büyük öneme sahiptir.

Bu bölüm, üç alt başlık altında ele alınmıştır. Birinci alt başlık, “Kısıtlar” olarak isimlendirilmiş, halihazırda balastaltı malzemesi için aktif olan 2020 “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nin içerikleri sunulmuş ve bu şartnamede, çelikhane cürufunun kullanımına engel teşkil eden maddeler ele alınmıştır. İkinci alt başlık, “Uluslararası Şartnameler” olarak isimlendirilmiş, çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanıldığı ülkelerdeki şartnameler bu bölümde sunulmuştur. Üçüncü alt başlık, “Karşılaştırma” olarak isimlendirilmiş, ulusal şartnamemiz ile uluslararası şartnameler arasındaki farklar, bu bölümde irdelenmiştir.

2.2.1. Kısıtlar

Ülkemizde balastaltı malzemesi için halihazırda aktif olan şartname; 2020 “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”dir. Bu şartname, TCDD Teşekkülünün Hızlı Tren (HT) / Yüksek Hızlı Tren (YHT) ve Konvansiyonel Hatları için; yeterli taşıma gücüne sahip demiryolu altyapısı (dolgu, yarma tabanı veya alt temel üzeri) üzerinde ve balast tabakası altında kullanılacak olan balastaltı

tabakasının özelliklerini ve uygulama şartlarını belirlemektedir. Şartnamede, balastaltı tabakasının hat cinsine göre iki farklı uygulama koşulu bulunmaktadır (Tablo 1). Tablo 1’de görüldüğü üzere; konvansiyonel hatlarda granüler balastaltı tabakasının (GBT) ve plent-miks balastaltı tabakasının (PMBT), yüksek hızlı ve hızlı hatlarda ise yalnızca PMBT’nin kullanımı uygun görülmektedir [10].

Tablo 1. Hatlara göre balastaltı tabakası uygulama kriterleri.

Balastaltı Tabakası Tipi	YHT / HT	Konvansiyonel Hatlar (KH)
Granüler Balastaltı Tabakası (GBT)	-	+
Plent Miks Balastaltı Tabakası (PMBT)	+	+

Balastaltı tabakası, “balast tabakasından gelen yüklere dayanabilen ve bu yükleri alttemel ve/veya tabana aktarabilen, ana kayadan koparılmış kırmataş olarak üretilen malzemeden oluşan tabaka” şeklinde tanımlanmaktadır. Balastaltı agregası olarak kullanılacak malzemelerin, TS EN 13242+A1, TS EN 13285 standartlarına uygun olması ve ocaktan elde edilen agregaların aşağıda maddeler halinde verilen genel şartları sağlaması gerekliliği belirtilmiştir [10].

- Yuvarlak, pürüzsüz dere çakılı kullanılmamalıdır.
- Agregası, pürüzlü yüzeyler verecek şekilde keskin kenarlı ve kübik parçalanmalıdır.
- Agregasının atmosfer şartlarına karşı direnci yüksek olmalıdır.
- Agregası, aşınmaya karşı yüksek sertlik ve mukavemete sahip olmalıdır.
- Agregası, noktasal dinamik ve statik basınçlara karşı yüksek dirençli olmalıdır.
- Agregası karışımının, sürtünme direnci ve içsel sürtünme açısı yüksek olmalıdır.
- Agregası, masif yapıda ve homojen olmalıdır.
- Agregası, zararlı bileşen, kil ya da toprak içeriği bulundurmamalıdır.

TS EN 13242 standardının adı; “İnşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı malzemeler için agregalar”dır. Bu standart, inşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan hidrolik bağlayıcılı ve bağlayıcısız malzemeler için doğal, yapay veya geri kazanılmış malzemelerin işlenmesiyle elde edilen agregaların özelliklerini kapsamaktadır [11]. TS EN 13285 standardının adı; “Bağlayıcısız karışım-Özellikler”dir. Bu standart, yolların, hava alanlarının ve trafiğin hâkim olduğu diğer alanların inşası ve bakımı için kullanılan, doğal ve geri

dönüştürülmüş agregalarla imal edilmiş bağlayıcısız karışımlar için gereksinimleri tanımlamaktadır [12].

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; iri agrega 4 ila 31,5mm aralığında kalan taneler, ince agrega, 4mm’den küçük taneler ve çok ince malzeme, 0,063mm’den küçük olan taneler olarak tanımlanmıştır.

Şartnamede, balastaltı malzemesinin yapımında kullanılacak agreganın, kırmataş olarak elde edilen çakıl, kum ve ince malzeme karışımlarından oluşması gerektiği belirtilmiştir. Agregalarda, donmuş malzeme ve herhangi bir nedenle karışmış yabancı malzemenin bulunmaması gerekmektedir [10]. TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi’nde; balastaltı malzemesine uygulanacak deneyler aşağıdaki şekilde sınıflandırılmış, deney standartları ve şartname limitleri tablolarda sunulmuştur.

- İri agrega fiziksel özellikleri (Tablo 2),
- İnce agrega fiziksel özellikleri (Tablo 3),
- Agrega geometrik özellikleri (Tablo 4),
- Çok ince agrega kimyasal özellikleri (Tablo 5),
- Balastaltı malzemesi laboratuvar performans özellikleri (Tablo 6),

Mikro-Deval Aşınma Direnci Tayini ve Sonnenbrand deneyleri, TCDD’nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deneyler olarak tanımlanmaktadır. Mikro-Deval Aşınma Direnci Tayini deneyi, iri taneli agregaların ve ihtilaf durumunda demiryolu balastı olarak kullanılan agregaların aşınma direncinin tayinine yönelik referans yöntem olarak tanımlanmaktadır [13]. TS EN 1367-3 standardı, bazalttaki "Sonnenbrand" beneklerinin varlığının ve bu tür beneklere sahip bazalttan üretilen agregaların parçalanmasının tayini için metotları kapsamaktadır [14].

Tablo 2. İri agrega fiziksel özellikleri.

Deney Adı	Standart	Şartname Limitleri	
		YHT / HT	Konvansiyonel
Su Emme (WA ₂₄)	TS EN 1097-6	≤ %2	≤ %2
Termal ve Bozunma Özelliği İçin MgSO ₄ Deneyi	TS EN 1367-2	≤ %18	≤ %18
Parçalanma Direnci (Los Angeles) (LA)	TS EN 1097-2	≤ %25	≤ %30
Kil Topakları ve Dağılabilen Malzeme Oranı	ASTM C-142	≤ %1,0	≤ %1,0
Aşınma Direnci Tayini (Mikro-Deval) (MD)	TS EN 1097-1	≤ %20	≤ %25
Sonnenbrand	Kaynatma Kaybı (SB)	≤ %1	≤ %1
	Mukavemet Kaybı SBLA	TS EN 1367-3	≤ %8

Tablo 3. İnce agrega fiziksel özellikleri.

Deney Adı	Standart	Şartname Limitleri
Likit Limit (LL)	TS EN 17892-12	NP
Plastisite İndeksi (PI)	TS EN 17892-12	NP
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	TS EN 1744-1	Negatif
Kum Eşdeğer Tayini	TS EN 933-8	≥ %70
Metilen Mavisi, (MB), g/kg	İnce agreganın 0,02 mm'lik kısmına	≤ 3,0 (MB _{3,0})
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0,02 mm kısmına	TS EN 933-9 ≤ 4,5 (MB _{4,5})

Kum Eşdeğer Tayini deneyi, TCDD'nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deney olarak tanımlanmaktadır. Metilen Mavisi deneyinde, magmatik kökenli kayalar için şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin ($\leq 3,0$ g/kg) sağlanamaması durumunda $\leq 4,5$ g/kg şartının aranması gerektiği belirtilmiştir [10].

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların, TS EN 933-3 standardı uyarınca belirlenen yassılık indeksinin en fazla % 25 olması öngörülmektedir [10].

Uniformluluk katsayısı (C_U), tanelerin %60'ının geçtiği elek açıklığı (D_{60}) ile tanelerin %10'unun geçtiği tane açıklığının (D_{10}) oranı olarak tanımlanmakta ve şartname kapsamında en küçük değerinin 15 olması istenmektedir. İyi derecelendirilmiş agrega karışımlarının, uniformluluk

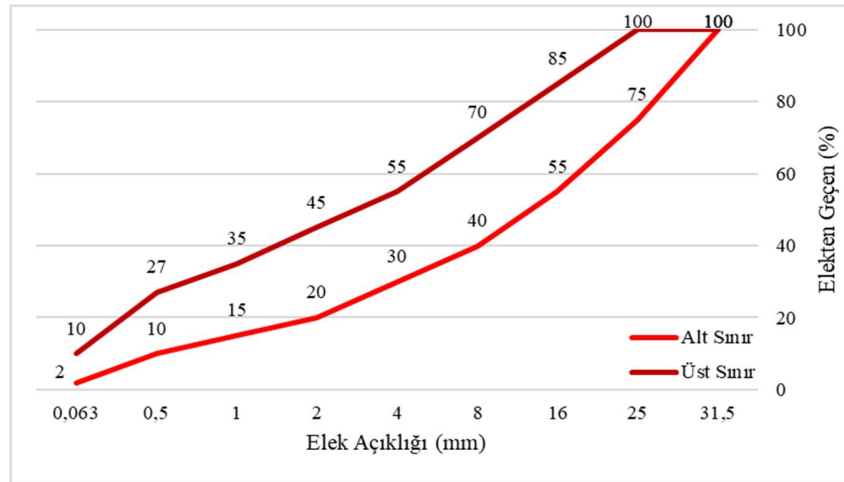
katsayısı 4'ten büyük olarak tanımlanmıştır [15]. Uniformluluk katsayısının formülü Eşitlik 1'de sunulmuştur.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Süreklilik katsayısı (C_r) ise tanelerin %30'unun geçtiği elek açıklığının (D_{30}) karesinin, tanelerin %10'unun geçtiği tane açıklığı (D_{10}) ile tanelerin %60'ının geçtiği elek açıklığı (D_{60}) çarpımına oranı olarak tanımlanmakta ve şartname kapsamında 1 ila 3 aralığında olması istenmektedir. İyi derecelendirilmiş agrega karışımlarının, süreklilik katsayısı 1 ila 3 arasında olarak tanımlanmıştır [15]. Süreklilik katsayısının formülü Eşitlik 2'de sunulmuştur.

$$C_r = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2)$$

GBT ve PMBT için şartnamede bir tane dağılımı belirlenmiştir. Söz konusu tane dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur. PMBT'nin sadece hızlı ve yüksek hızlı hatlar için tanımlanmış olmasının nedeni bu karışımın plentte hazırlanması sonucu daha uniform bir yapı göstermesidir.



Şekil 2. Balastaltı tabakası tane dağılımı.

Çok ince agregaların kimyasal özellikleri için gerekli kriterler Tablo 4’te sunulmuştur. Fakat TS EN 1744-1 kapsamında tanımlanan üç deney de TCDD’nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deneyler olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak şartname kapsamında; ince agregaların fiziksel özelliklerinin, aşağıdaki maddelerden birini karşılaması durumunda, çok ince agregalar zararsız kabul edilmiş ve çok ince agrega kimyasal özellikleri (Tablo 4) için deneylerin yapılmasının zorunlu olmadığı ifade edilmiştir [10].

- Çok ince ($\leq 0,063$ mm) malzeme oranının % 3’ e eşit veya az olması,
- Metilen Mavi değerinin 0-2 mm agregada sınır değerlerinden küçük olması,
- Kum eşdeğer tayini değerinin 0-4 mm agregada sınır değerlerinden az olması.

Tablo 4. Çok ince agrega kimyasal özellikleri.

Deney Adı	Standart	Şartname Limitleri	
		YHT / HT	Konvansiyonel
Toplam Kükürt İçeriği * (NOT: Pirotin minerali mevcut ise ilave önlemler alınacaktır)	TS EN 1744-1	$\leq \%1$	$\leq \%1$
Kızdırma Kaybının Tayini, % *	TS EN 1744-1	$\leq \%2$	$\leq \%2,5$
Asitte ve/veya Suda Çözülebilir Sülfat İçeriği*	SS	$\leq \%0,2$	$\leq \%0,7$
	AS	$\leq \%0,2$	$\leq \%0,8$

Tablo 4’te dikkat çekilen pirotin; inşaat endüstrisi için endişe oluşturan bir mineral olarak tanımlanmaktadır. Demir ve kükürten oluşmakta ve su ve havaya maruz kaldığında, genişler ve parçalanarak ikincil mineraller oluşturmaktadır. Her türlü yapının stabilitesini bozma ihtimali mevcuttur [16].

Balastaltı tabakasının laboratuvar performans özellikleri, Tablo 5’te sunulmuştur. Şartnamede, maksimum kuru birim hacim ağırlığın ($\gamma_{d,maks}$) modifiye Proctor, CBR ve şişme değerlerinin de modifiye yaş CBR deneyi ile belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Tablo 5. Laboratuvar performans özellikleri.

Deney Adı	Standart	PMBT	GBT
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı $\gamma_{d,maks}$	TS EN 13286	$\geq 19 \text{ kN/m}^3$	$\geq 19 \text{ kN/m}^3$
CBR	TS EN 13286-47	$\geq \% 100$	$\geq \% 80$
% Şişme Oranı	TS EN 13286-47	$\leq \% 0,5$	$\leq \% 0,5$
Geçirgenlik (Permeabilite)*	TS EN 17892-12	$\leq 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$\leq 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

2.2.2. Uluslararası Şartnameler

Çelikhane cürufunun, demiryolu uygulamalarında kullanımı, karayolu inşaatındaki kadar yaygın değildir. Belirli uygulamalara ABD, Avustralya Brezilya, Kanada ve Hindistan'da rastlanmaktadır [17]. Uygulamaların gerçekleştirildiği bu ülkeler arasında ABD ve Avustralya'nın şartnamelerinde çelikhane cürufu doğrudan geçmektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında ABD ve Avustralya şartnameleri incelenmiştir.

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA)

AREMA şartnamesinde, 10 numaralı eleğin (2mm) üzerinde kalan malzemenin, sert ve dayanıklı, agrega, çakıl, kum veya cüruftan oluşması gerektiği belirtilmektedir. Buna ek olarak, %100'ü kırılmış olmak şartı ile ocak artığı ve betonun kullanılabilceği ifade edilmektedir [18, 19]. Şartnamedeki diğer koşullar aşağıda sunulmuştur:

- Donma-çözülme veya ıslanıp-kuruma etkileri ile değişime uğrayan agregalar kabul edilmemektedir [18], Na_2SO_4 çözültisi ile gerçekleştirilecek donma-çözülme deneyinde maksimum kaybın %10 olması istenmektedir [19].
- Los Angeles parçalanma direnci %50'den fazla olan agregalar kabul edilememektedir [18, 19].

Balastaltı malzemesine ilişkin tane dağılımı Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. AREMA balastaltı malzemesi tane dağılımı [18, 19].

Elek Açıklığı (mm)	Alt Sınır Geçen (%)	Üst Sınır Geçen (%)
50	100	100
25	90	100
9,5	50	84
2	26	50
0,425	12	30
0,075	0	5

Yukarıda tanımlanan kısıtlara ek olarak, kullanılacak malzemenin minimum özgül ağırlığının 2,400 t/m³ olması istenmektedir. Bunun yanı sıra kullanılacak malzemenin Atterberg Limitleri ile ilgili zorunlu iki değerlendirme söz konusudur. İlk değerlendirmede; kullanılacak olan malzemenin doğrudan elenerek elde edilen 0,425mm'den küçük tanelerin likit limit değerinin maksimum % 25, plastisite indeksi değerinin ise maksimum % 6 olması istenmektedir. İkinci değerlendirmede ise Los Angeles deneyi sonucunda oluşan 0,425mm'den küçük tanelerin non-plastik özelliğe sahip olması istenmektedir [18].

Australian Rail Track Corporation Limited (ARTC)

Avustralya'da balastaltı tabakası "capping layer" olarak tanımlanmaktadır [20]. ARTC şartnamesinde; balastaltı tabakası için iyi derecelenmiş doğal veya yapay olarak karıştırılmış çakıl/toprak önerilmektedir. Statik veya titreşimli silindirler ile yüksek yoğunluklarda sıkıştırılmasına izin verecek yeterli ince malzemeye sahip olması gerektiği ifade edilmektedir. Bitkisel madde içermeyen doğal malzemelerin, çakıl, düşük kil içerikli kumtaşlarının ve kırılmış, sert ve dayanıklı agrega veya cüruf karışımlarının bu özellikleri karşıladığı belirtilmektedir [21]. Balastaltı tabakasında kullanılacak malzemelerin özellikleri, Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. ARTC balastaltı malzemesi özellikleri [21].

Deney Adı	Şartname Limitleri
Kil Topakları Oranı	< %5
Yumuşak ve Dağılabilen Malzeme Oranı	< %0,5
Parçalanma Direnci (Los Angeles) (LA)	< % 30
Likit Limit (LL)	< % 30
Plastik Limit (PL)	< % 20
Plastisite İndeksi (PI)	% 2-10
Doğrusal Büzülme	< %3

Tablo 7'de görüldüğü üzere kullanılacak malzeme için likit limit değerinin maksimum %30, plastik limit değerinin ise maksimum %20 olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca kullanılacak malzeme tanımında "bitkisel madde içermeyen doğal malzemelerin" ve "düşük kil içerikli kumtaşlarının" kullanımının mümkün olduğu ifade edilmiştir [21]. Kil içeriği bulunan zeminlerde, şişme-büzülme

durumu söz konusudur. Su ile karşılaşan kil ilk olarak şişmekte suyun bünyeden uzaklaşması ile büzülme meydana gelmektedir. Büzülme ile kuruma çatlakları meydana gelmekte ve bu çatlaklar üstyapının stabilitesini bozabilmektedir [22]. Bu bağlamda ARTC şartnamesinde, büzülme ile ilgili maksimum limit %3 olarak tanımlanmaktadır.

ARTC’de balastaltı malzemesi için tanımlanan tane dağılımı Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. ARTC balastaltı malzemesi tane dağılımı [21].

Elek Açıklığı (mm)	Alt Sınır Geçen (%)	Üst Sınır Geçen (%)
26,5	100	100
19	95	100
2,36	30	80
0,075	6	10

Tablo 7’de tanımlanan malzeme fiziksel özelliklerine ek olarak ARTC’de, $\gamma_{d,max}$ ’ın en az 19,62kN/m³ olması ve %95’e kadar sıkıştırılmış karışıma uygulanacak modifiye yaş CBR deneyinde, CBR değerinin en az %50 olması istenmektedir [21].

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölüm kapsamında; ulusal ve uluslararası şartnamelerin karşılaştırılması yapılmış, çelikhane cürufunun, ülkemizde balastaltı malzemesi olarak kullanımını destekleyen ve engelleyen koşullar değerlendirilmiştir. İrdeleme, 2020 yılı “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde yer verilen sıralamaya göre yapılmıştır.

Ülkemizde balastaltı malzemesi için halihazırda aktif olan 2020 “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde balastaltı tabakasının hat cinsine göre iki farklı uygulama koşulu bulunmaktadır (Tablo 1). AREMA ve ARTC şartnamelerinde bu tip bir ayrıma gidilmediği görülmektedir.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesinin yapımında kullanılacak agreganın, kırmataş olarak elde edilen çakıl, kum ve ince malzeme karışımlarından oluşması gerektiği belirtilmiştir. Agregalarda, donmuş malzeme ve herhangi bir nedenle karışmış yabancı malzemenin bulunmaması gerekmektedir. Bunun yanı sıra balastaltı tabakasında kullanılacak malzemelerin, TS EN 13242+A1, TS EN 13285 standartlarına uygun olması gerekliliği

belirtilmiştir. TS EN 13242 standardı, inşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan hidrolik bağlayıcılı ve bağlayıcısız malzemeler için doğal, yapay veya geri kazanılmış malzemelerin işlenmesiyle elde edilen agregaların özelliklerini kapsamaktadır [11]. TS EN 13285 standardı, yolların, hava alanlarının ve trafiğin hâkim olduğu diğer alanların inşası ve bakımı için kullanılan, doğal ve geri dönüştürülmüş agregalarla imal edilmiş bağlayıcısız karışımlar için gereksinimleri tanımlamaktadır [12]. Balastaltı şartnamesinde geri dönüştürülmüş agregaya yer verilmemiş olup bu şartnameye göre agreganın uyması gereken TS EN 13242 ve TS EN 13285 standartlarında geri dönüştürülmüş agreganın kullanımı desteklenmektedir. AREMA şartnamesinde, malzemenin, sert ve dayanıklı, agrega, çakıl, kum veya *cüruf*tan oluşması gerektiği belirtilmiştir. Buna ek olarak, %100'ü kırılmış olmak şartı ile ocak artığı ve geri dönüştürülmüş betonun kullanılabilmesi ifade edilmiştir [18, 19]. ARTC şartnamesinde ise bitkisel madde içermeyen doğal malzemelerin, çakıl, düşük kil içerikli kumtaşlarının ve kırılmış, sert ve dayanıklı agrega veya *cüruf*karışımlarının balastaltı malzemesi olarak kullanılabilmesi ifade edilmiştir [21]. TCDD şartnamesinde, *cüruf*un kullanılacak malzemeler arasında tanımlanmamasına karşın şartnamenin atıfta bulunduğu TS EN 13242+A1 ve TS EN 13285 standartları, geri dönüştürülmüş agregaların kullanımını desteklemektedir.

TCDD, AREMA ve ARTC şartname limitleri, karşılaştırmalı olarak Tablo 9'da sunulmuştur. Şartnamelere ilişkin detaylar, literatürde elde edilmiş sonuçlar ve özel hususlar ayrıca açıklanmıştır.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların su absorpsiyonu değerinin tüm hatlar için maksimum %2 olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamelerinde su absorpsiyonuna ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Çelikhane *cüruf*una ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; su absorpsiyonu değerinin %0,9 ila %3,7 arasında olduğu [23-31] belirtilmiştir. Çelikhane *cüruf*unun, su absorpsiyonu değerleri geniş bir aralık göstermektedir. Bu aralık mevcut şartname limiti olan % 2'den küçük ve büyük değerleri kapsamaktadır. Ayrıca AREMA ve ARTC şartnamelerinde su absorpsiyonuna ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Bununla birlikte çelikhane *cüruf*unun, çelik üretim tesisindeki üretim uygulamaları ve sonrasında *cüruf*un işlenmesine yönelik uygulamalar ile su absorpsiyonu değerlerinin düşürülmesi olasıdır.

Tablo 9. Şartname Limitlerinin Karşılaştırılması.

Parametreler	Şartnameler								
	TCDD			AREMA			ARTC		
	YHT / HT	KH		AREMA			ARTC		
PMBT	GBT	PMBT	LL	PI	Parçalanmış Taneler	LL	PL	PI	
Su Absorpsiyonu (%)		< 2			-			-	
MgSO ₄ veya Na ₂ SO ₄ Deneysel Sonucu (%)		< 18			< 10			-	
Los Angeles Parçalanma Direnci (%)	< 25		< 30		< 50			< 30	
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı (%)		< 1			-		Kil Topakları Oranı < 5	Dağılabilen Tane Oranı < 0,5	
Mikro-Deval Aşınma Direnci (%)	< 20		< 25						
Atterberg Limitleri		Non-plastik		Tabii Hal LL < 25	PI < 6	Parçalanmış Taneler Non-plastik	LL < 30	PL < 20	PI 2-10
Organik Madde İçeriği (%)		0			-			-	
Kum Eşdeğerliliği (%)		> 70			-			-	
Metilen Mavisi (g/kg)		< 3 / < 4,5 (Magmatik)			-			-	
Yassılık İndeksi (%)		< 25			-			-	
C _u		> 15			-			-	
C _r		1-3			-			-	
γ _{d,max} (kN/m ³)		> 19,000			-		> 19,620		
CBR (%)	> 100	> 80	> 100		-		> 50		
Şişme (%)		0,5			-			-	
Permeabilite (m/s)		5x10 ⁻⁵			-			-	
Özgül Ağırlık (t/m ³)		-			> 2,400			-	
Doğrusal Büzülme (%)		-			-			< 3	

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların MgSO₄ çözeltisinin kullanıldığı donma-çözülme deneyinde parçalanma oranının tüm hatlar için maksimum %18 olması istenmektedir. AREMA şartnamesinde, Na₂SO₄ çözeltisi ile gerçekleştirilecek donma-çözülme deneyinde maksimum kaybın %10 olması istenmektedir. ARTC şartnamesinde ise donma-çözülme deneyine ilişkin bir limit bulunmamaktadır. “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde maksimum parçalanma oranının AREMA şartnamesine oranla yüksek kabul edilmesinin nedeni MgSO₄’ın Na₂SO₄’e oranla daha aşındırıcı olmasıdır [32]. Çelikhane

cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; donma-çözülme deneyinde parçalanmış tane oranının %0,5 ila %2,5 arasında olduğu [24-27, 31, 33-36] belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmalar kapsamında, çelikhane cürufunun doğal agregaya oranla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Gözlemlenen sonuçlar, mevcut şartnamedeki limit değeri karşılamaktadır. Buna ek olarak çelik tesisindeki üretim uygulamaları ve sonrasında cürufun işlenmesine yönelik uygulamalar ile su absorpsiyonunun düşürülmesi, çelikhane cürufunun halihazırda düşük olan donma-çözülme hassasiyetini daha da artırması olasıdır.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların Los Angeles parçalanma direnci deneyinde parçalanmış tane oranının YHT/HT hatlarında maksimum %25, konvansiyonel hatlarda ise maksimum %30 olması istenmektedir. AREMA şartnamesinde bu değer %50, ARTC şartnamesinde ise %30 olarak tanımlanmıştır. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; parçalanmış tane oranının %12 ila %25 arasında olduğu [23-28, 30, 33-35, 37, 38] belirtilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar, şartnamedeki limitlere uymaktadır. Ayrıca çelikhane cürufu için Los Angeles deneylerinden elde edilen sonuçların, doğal agregaya benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Çelikhane cürufu, su absorpsiyonu nispeten yüksek poroz tanelerden oluşmakta ve bu poroz yapısı nedeniyle kırılabilir davranabilmektedir. Bu doğrultuda ek kırma-eleme işlemleri ile çelikhane cürufunun Los Angeles deneyi parçalanmış tane oranının ihtiyaçlar doğrultusunda düşürülmesi olasıdır.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların, kil topağı ve dağılabilen tane oranının tüm hatlar için maksimum %1 olması istenmektedir. AREMA şartnamesinde, bu hususa ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. ARTC şartnamesinde ise kil içerikli malzemenin kullanımına müsaade edildiğinden kil topakları limiti %5 ve dağılabilen tane oranı %0,5 olmak üzere iki kısıt tanımlanmıştır. Çelikhane cürufunda stok alanında kontaminasyon olmadığı sürece kil-silt gibi bileşenlerin bulunması beklenmemektedir. Bununla birlikte özellikle taze çelikhane cürufu içeriğindeki CaO ve MgO bileşenlerinin hidrasyon ile bünyeden uzaklaşması olasıdır. Dolayısıyla dağılabilen tane oranı, çelikhane cürufu için bir kısıt olarak öngörülebilir. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; dağılabilen tane oranının %0 ila %0,7 arasında olduğu [39-40] belirtilmiştir. Bu değerler, mevcut şartnamede tanımlanmış olan %1 limitinin altındadır. Buna ek olarak yeterli yaşlandırma ile çelikhane

cürufunun dağılılabilen tane oranının, ihtiyaçlar doğrultusunda düşürülmesi olasıdır.

Mikro-Deval Aşınma Direnci Tayini, TCDD'nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deney olarak tanımlanmakla birlikte TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi'nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların Mikro-Deval aşınma direnci deneyinde kayıp tane oranının YHT/HT hatlarında maksimum %20, konvansiyonel hatlarda ise maksimum %25 olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamesinde, bu deneye ilişkin herhangi bir limit bulunmamaktadır. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; kayıp tane oranının %6 ila %12 arasında olduğu [37, 42, 43] belirtilmiştir. Bu değerler, mevcut şartnamede tanımlanmış olan %20 ve %25 limitlerinin altındadır. Bununla birlikte Micro-Deval deneyi çelikhane cürufunun parçalanma eğilimine ve su etkisi ile bünyeden uzaklaşması olası bileşen miktarına ışık tutmaktadır. Bu bakımdan mevcut şartnamede TCDD'nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deney olarak tanımlanan Micro-Deval deneyinin, çelikhane cürufu için zorunlu hale getirilmesi önerilebilir. İhtiyaç duyulması halinde çelikhane cürufunun Micro-Deval deney sonucunun, yaşlandırma ve ek kırma-eleme gibi işlemlerle azaltılması da olasıdır.

Sonnenbrand deneyi, TCDD'nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deney olarak tanımlanmakla birlikte bazalttaki "Sonnenbrand" beneklerinin varlığının ve bu tür beneklere sahip bazalttan üretilen agregaların parçalanmasının tayini için metotları kapsamaktadır [14]. Dolayısıyla bu kısıt çelikhane cürufu için geçerli değildir.

Balastaltı tabakasının teşkil edileceği ince malzeme özellikleri arasında "TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi"nde ilk olarak Atterberg limitleri tanımlanmıştır. Şartnameye göre ince malzemenin non-plastik olması istenmektedir. AREMA şartnamesine göre Atterberg Limitleri ile ilgili zorunlu iki değerlendirme söz konusudur. İlk değerlendirmede; kullanılacak olan malzemedan doğrudan elenerek elde edilen 0,425mm'den küçük tanelerin likit limit değerinin maksimum %25, plastisite indeksi değerinin ise maksimum %6 olması istenmektedir. İkinci değerlendirmede ise Los Angeles deneyi sonucunda oluşan 0,425mm'den küçük tanelerin non-plastik özelliğe sahip olması istenmektedir. ARTC şartnamesinde ise Likit Limit LL'nin %30'dan, PL'nin %20'den küçük olması, PI değerinin ise %2 ila %10 arasında olması istenmektedir. Çelik üretimi sırasında ek kirleticilerin işlemlere dahil olmaması için gerekli önlemler alınmaktadır. Kil ve silt gibi

malzemelerin üretime bir şekilde girmesi durumunda dahi ısıtma üretilen işlemleri sonucunda doğal davranışlarını koruyacak şekilde kirletici olma olasılıkları bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra cürufun, stok sahasında hafriyat ya da diğer kirleticilere maruz kalmayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir [41].

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların ince kısmının, %3 NaOH çözeltisi ile gerçekleştirilecek deney doğrultusunda organik madde içeriğine sahip olmaması istenmektedir. ARTC şartnamesinde, agreganın bitkisel madde içermemesi gerektiği ifade edilmiştir. AREMA şartnamesinde, agreganın 2mm’den büyük kısmının “agrega, çakıl, kum veya cürufun” oluşması gerektiği belirtilmiş fakat 2mm’den küçük ince agreganın organik madde içeriğine ilişkin bir kısıt tanımlanmamıştır. Özel durumlar haricinde çelikhane cürufu içeriğinde, üretim sıcaklıkları nedeniyle organik madde bulunma olasılığı yoktur. Fakat dikkat edilmediği durumlarda, stok sahasında cürufun kontamine olma olasılığı mevcuttur [41].

Kum Eşdeğerlilik Tayini deneyi, TCDD’nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deney olarak tanımlanmakla birlikte “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların ince kısmının, kum eşdeğerliliğinin %70’ten büyük olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamesinde ince agrega kum eşdeğerliliğine ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Kum eşdeğerliği deneyi, ince agregadaki kil, silt oranının hızlı bir şekilde belirlenmesi için yapılmaktadır. Temel olarak formaldehit, kalsiyum klorür ve gliserinden oluşan yıkama solüsyonu ilavesi ile kilin askıda kalması sağlanarak yapılan yükseklik ölçümlerinde kum yüksekliğinin kum ve askıda kalan ince malzeme yüksekliğine oranı, kum eşdeğerliği sonucunu vermektedir [44]. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; kum eşdeğerlilik oranının %53 ila %92 arasında olduğu [45, 46, 47] belirtilmiştir.

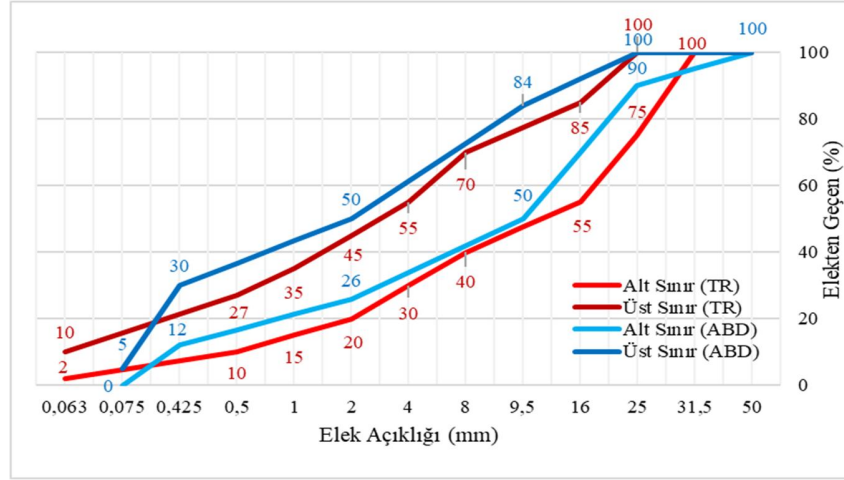
“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde, balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların, 0,02mm’lik elekten geçen kısmının, metilen mavisi deney sonucunun 3g/kg’dan küçük olması istenmektedir. Magmatik kökenli kayalar için şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin ($\leq 3,0$ g/kg) sağlanamaması durumunda $\leq 4,5$ g/kg şartının aranması gerektiği belirtilmiştir. AREMA ve ARTC şartnamesinde ince agrega için metilen mavisi deneyine

ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; metilen mavisi değerinin 0,1 ila 0,67 g/kg arasında olduğu [45, 48, 49] belirtilmiştir. Önceki paragraflarda da belirtildiği üzere; kontaminasyon olmadığı takdirde çelikhane cürufunda kil, silt ve organik kirleticilerin bulunma olasılığı yoktur. Uygulamaya engel teşkil etmesi olası bu üç içerik, malzemenin Atterberg limitlerini, organik madde içeriğini, kum eşdeğerlilik değerini ve metilen mavisi deney sonucunu etkilemektedir. Çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanımı durumunda stok sahasında gerekli düzenlemenin yapılarak kontaminasyona mahal verilmemesi bir zorunluluk olmaktadır. Bununla birlikte kum eşdeğerlilik ve metilen mavisi deneylerinde $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$ sebebiyle farklı değerlerin gözlemlendiği ulusal ve uluslararası çalışmalarda belirtilmiştir. Bu bakımdan çelikhane cürufu için metilen mavisi deneyinin zorunlu olarak tanımlanması ve Atterberg limitleri, kum eşdeğerlilik ve metilen mavisi deneylerinden elde edilecek sonuçların ortak değerlendirilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

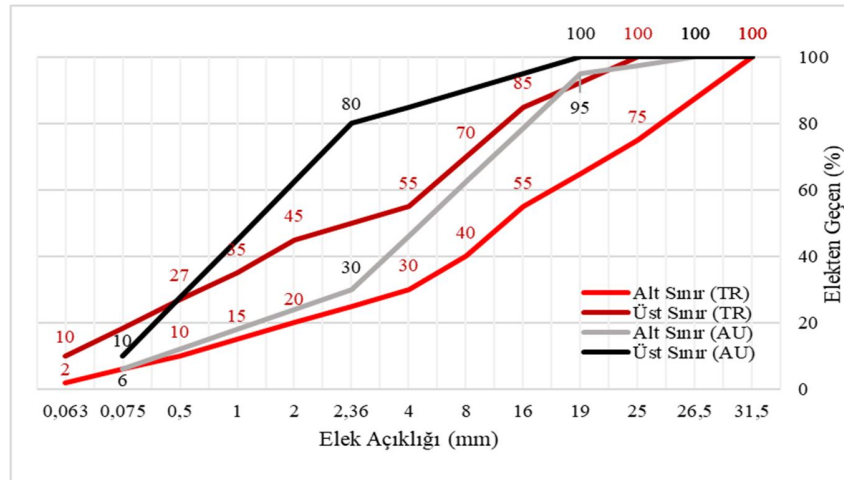
“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların, yassılık indeksinin en fazla %25 olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamesinde yassılık indeksine ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; yassı tane oranının %5 ila %18 arasında olduğu [25, 38, 50, 51] belirtilmiştir. Bu sonuçlar, yassılık indeksi değerinin mevcut şartnamede tanımlanmış olan %25 limitinin altında olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak çelikhane cürufunun yassılık indeksinin doğal agregaya nazaran düşük olduğu yine bu çalışmalarda ifade edilmiştir.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların tane dağılımlarının uniformluk değerinin 15’ten büyük olması, süreklilik değerinin ise 1 ila 3 arasında olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamesinde tane dağılımının uniformluk ve süreklilik değerlerine ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır.

TCDD, AREMA ve ARTC şartnamelerinde balastaltı malzemesine ilişkin tane dağılımları belirtilmiş olup Şekil 3’te TCDD (TR) ve AREMA (ABD) tane dağılımları, Şekil 4’te ise TCDD (TR) ve ARTC (AU) tane dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3. TCDD ve AREMA şartnameleri tane dağılımı karşılaştırması.



Şekil 4. TCDD ve ARTC şartnameleri tane dağılımı karşılaştırması.

Şekil 3 incelendiğinde, TCDD ve AREMA şartnamelerinde sunulan tane dağılımlarının büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Bununla birlikte TCDD şartnamesinde EN elekleri esas alınmışken AREMA şartnamesinde ASTM elekleri esas alınmıştır. Şekil 4 incelendiğinde ise TCDD ve ARTC şartnamelerindeki tane dağılımlarının oldukça farklı olduğu görülmektedir. Çelikhane cürufunun tane dağılımı, konkasör ve elek marifetiyle istenilen şekilde ayarlanabilmektedir. Bunun yanı sıra uniformluk ve süreklilik koşulları da dikkate alındığında,

mevcut şartnamenin AREMA ve ARTC şartnamelerine oranla daha yoğun bir gradasyon sergileyeceği açıktır.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; balastaltı malzemesi olarak kullanılacak agregaların çok ince kısmının kimyasal özellikleri için kriterler tanımlanmıştır. Bu kriterler, TCDD'nin, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmasına karar vereceği deneyler olarak belirtilmektedir. Buna ek olarak şartname kapsamında; ince agregaların fiziksel özelliklerinden, çok ince ($\leq 0,063$ mm) malzeme oranının %3'e eşit veya az olması, metilen mavisi değerinin 0-2 mm agregada sınır değerlerinden küçük olması veya kum eşdeğerinin 0-4 mm agregada sınır değerlerden az olması durumunda çok ince agregalar zararsız kabul edilmiş ve çok ince agrega kimyasal özellikleri için deneylerin yapılmasının zorunlu olmadığı ifade edilmiştir. Aksi durumlarda, çok ince agreganın toplam kükürt içeriğinin tüm hatlarda %1'den küçük olması, kızdırma kaybının YHT/HT hatlarda %2'den, konvansiyonel hatlarda %2,5'ten küçük olması, suda çözünebilen sülfat içeriğinin YHT/HT hatlarda %0,2'den, konvansiyonel hatlarda %0,7'den küçük olması veya asitte çözünebilen sülfat içeriğinin YHT/HT hatlarda %0,2'den, konvansiyonel hatlarda %0,8'den küçük olması istenmektedir. AREMA ve ARTC şartnamelerinde çok ince malzemenin kimyasal özelliklerine ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. Çelikhane cürufu, endüstriyel işlemler sonucu ortaya çıkan bir yan ürün olduğu için her durumda bu parametrelerin kontrol edilmesi ve çevresel analiz değerlendirilmesi yapıldıktan sonra uygulamada kullanılması öngörülmektedir.

“TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde; balastaltı malzemesi olarak teşkil edilecek karışımın laboratuvar performans özellikleri tanımlanmıştır. Modifiye Proctor deneyi ile belirlenecek $\gamma_{d,max}$ değerinin, PMBT ve GBT için 19kN/m^3 'ten büyük olması istenmektedir. Modifiye yaş CBR deneyi ile ölçülen CBR değerinin PMBT'de %100'den, GBT'de ise %80'den büyük olması istenmektedir. Modifiye yaş CBR deneyinde, 96 saat sonundaki şişme oranının her iki karışım için %0,5'ten küçük olması istenmektedir. Bu hususlara ek olarak her iki karışımın permeabilite değerlerinin 5×10^{-5} m/s'den küçük olması istenmektedir. AREMA şartnamesinde karışımın laboratuvar performans özelliklerine ilişkin bir kısıt bulunmamaktadır. ARTC şartnamesinde, modifiye Proctor deneyi ile belirlenecek $\gamma_{d,max}$ değerinin en az $19,62\text{kN/m}^3$ olması ve karışıma uygulanacak modifiye yaş CBR deneyinde, CBR değerinin en az %50 olması istenmektedir.

Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan uluslararası çalışmalarda; tamamen çelikhane cürufundan oluşan karışımların CBR değerlerinin %40 ila %300 arasında olduğu [52, 53, 54] belirtilmiştir. Buna ek olarak Sas tarafından 2015 yılında gerçekleştirilen çalışmada, çelikhane cürufu karışımlarının zayıf gradasyon ve satürasyon koşullarından doğal agregaya nazaran daha fazla etkilendiği ifade edilmiştir [54]. Çelikhane cürufu ile üretilen karışımlara uygulanan CBR deneylerinde geniş bir sonuç aralığı belirlenmiştir. Sonuçların bir kısmı, çalışmalarda kontrol amacıyla üretilmiş doğal agrega karışımlarından elde edilen değerlere çok yakınken yoğun granülometri ile üretilmiş karışımlarda çok yüksek CBR değerleri de gözlemlenmiştir. Çelikhane cürufunun pürüzlü ve poroz yapısı, içsel sürtünme açısını arttırmakta özellikle mevcut şartnamede de tanımlanmış olan yoğun granülometrilik karışımlarda yüksek CBR sonuçlarının elde edildiği belirtilmiştir.

Belirtilen bu hususların yanı sıra TCDD şartnamesinde bulunmayan fakat AREMA ve ARTC şartnamelerinde bulunan iki kısıt mevcuttur. Bunlardan ilki; AREMA şartnamesinde tanımlanan minimum özgül ağırlığının $2,400 \text{ t/m}^3$ olması koşuldur. Çelikhane cürufuna ilişkin yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalarda; özgül ağırlığın 3,016 ila 4,007 arasında olduğu [23-31, 33, 34, 37, 38] belirtilmiştir.

ARTC şartnamesinde kil ve silt içeren malzemenin balastaltı tabakasının teşkilinde kullanımına izin verildiği için doğrusal büzülme bir kısıt olarak tanımlanmıştır. Yaşlandırılmamış çelikhane cürufu bünyesindeki serbest MgO ve CaO, su ile hidrate olarak genişleme reaksiyonunu başlatmaktadır. Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak herhangi bir uygulamada kullanılmasından sonra meydana gelecek genişleme istenmeyen iç gerilmelere ve hatta yapının bozulmasına neden olabilmektedir [55]. AREMA ve ARTC şartnamelerinde yoğun bir gradasyon tanımlanmaması nedeniyle bu bileşenlerin genişlemesinin kontrolüne ilişkin herhangi bir kısıt bulunmadığı düşünülmektedir. Fakat çelikhane cürufunun, ülkemizde balastaltı malzemesi kullanılması durumunda, genişleme miktarının belirlenmesi ve tanımlanacak bir limit ile kontrol altına alınması zorunludur. Halihazırda dünya genelinde genişleme potansiyelinin belirlenmesine ilişkin EN 1744 ve ASTM D4792 olmak üzere iki standart mevcuttur. Bu deneylerden ülkemizde uygulanabilir olanının seçilmesi ve bir limitle genişleme potansiyeli olan agregalar için koşul kabul edilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Sürdürülebilirlik kapsamında, ülkemizde lokomotif sektör konumunda olan inşaat sektörünün çevresel etkilerinin bir nebze olsun indirgenebilmesi için geri dönüştürülmüş ya da yapay agregaların uluslararası örneklerde olduğu gibi Türkiye için de bir alternatif olması önem taşımaktadır.

Bu bağlamda çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanımı için bu malzemenin hali hazırda kullanıldığı ülkelerin şartnameleri, mevcut ulusal şartnamemiz ile karşılaştırılmıştır.

Mevcut ulusal şartnamede, atıfta bulunulan standartlarda “geri dönüştürülmüş agregalar” ifadesinin yer almasına karşın şartnamede, bu malzemeye ilişkin herhangi bir değerlendirme yoktur. Standartlarda yer alan bu tanımın mevcut şartnameye taşınması, çelikhane cürufunun kullanılabilirliğinin hukuki altlığını oluşturabilir.

Mevcut kısıtlar kapsamında ise çelikhane cürufunun kullanımı durumunda; Micro-Deval deneyinin zorunlu deneyler kapsamına alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Ayrıca metilen mavisi deneyinin de çelikhane cürufu için zorunlu olarak tanımlanması ve Atterberg limitleri, kum eşdeğerlilik ve metilen mavisi deneylerinden elde edilecek sonuçların ortak değerlendirilmesinin uygun olacağı öngörülmektedir. Bunlara ek olarak çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanımı durumunda stok sahasında gerekli düzenlemenin yapılarak kontaminasyona mahal verilmemesi bir zorunluluk olmaktadır.

Çelikhane cürufuna yapılan deneylerde yetersiz sonuçların elde edilmesi durumunda, çelikhane cürufunun fiziksel özelliklerinin ve bir takım kimyasal özelliklerinin, uygulamanın gerektirdiği şekilde düzenlenme imkânı mevcuttur.

Çelikhane cürufu, endüstriyel işlemler sonucu ortaya çıkan bir yan ürün olduğu için her durumda mevcut şartnamede çok ince agrega için tanımlanmış olan kimyasal parametrelerin kontrol edilmesi ve çevresel analiz değerlendirilmesinin yapılmasının zorunlu olması gerektiği öngörülmektedir.

Yaşlandırılmamış çelikhane cürufu bünyesindeki serbest MgO ve CaO, su ile hidrate olarak genleşme reaksiyonunu başlatmaktadır. Çelikhane cürufunun, ülkemizde balastaltı malzemesi kullanılması durumunda, genleşme miktarının belirlenmesi ve tanımlanacak bir limit ile kontrol altına alınması zorunludur. Halihazırda dünya genelinde genleşme potansiyelinin belirlenmesine

ilişkin EN 1744 ve ASTM D4792 olmak üzere iki standart mevcuttur. Bu deneylerden ülkemizde uygulanabilir olanının seçilmesi ve bir limitle genişleme potansiyeli olan agregalar için koşul kabul edilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

Yapılan bu değerlendirmeler kapsamında; çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanımının desteklendiği AREMA ve ARTC şartnameleri, “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi” ile karşılaştırılmıştır. AREMA ve ARTC şartnamelerine kıyasla “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nin daha fazla parametreyi dikkate aldığı ve daha rijit bir şartname olduğu açıktır. Bununla birlikte gerekli laboratuvar çalışmalarının ve deneme uygulamalarının yapılması ile elde edilecek sonuçlar ışığında, “TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi”nde yapılacak basit düzenlemeler ile çelikhane cürufunun balastaltı malzemesi olarak kullanımının yolunu açmak mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Karalar, R., Çevresel Sorunlara Karşı bir Çözüm Önerisi Olarak Sürdürülebilir Tüketim Düşüncesi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 30, 63-76, 2011.
- [2] Sönmez, İ., Asfaltta geri dönüşüm ve geri dönüşüm sistemleri, Yol Teknolojileri, 21, 94-96, 2013.
- [3] Yılmaz, A., Ferrookrom ve Silikoferrookrom Cürufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye, 2008.
- [4] NSA, Steelmaking Slag: A Safe and Valuable Product, The Steel Slag Coalition-National Slag Association, Washington, 1998.
- [5] T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Demir Çelik Sektör Raporu, Sektörel Raporlar, Ankara, 2021.
- [6] FHWA, User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication Number: FHWA-RD-97-148, 2017.
- [7] TechnoBee Ltd. Şti., EAF ile Çelik Üretiminde Oluşan Cürufların Değerlendirilme Olanakları, Ülkemizde ve Dünyada Mevcut Durumun Analizi, İstanbul, 2012.
- [8] MÇT Ltd. Şti., İskenderun Cüruf Geri Kazanım Tesisi Nihai ÇED Raporu, MGS Proje Müş. Müh. Ltd. Şti., Ankara, 2009.
- [9] Yalçın, N. S., Erel, A., Yüksek hızlı demiryollarında altyapının önemi ve tasarım ilkeleri, 7.



Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 323-344, 2007.

[10] TCDD, Sub-Balast Teknik Şartnamesi, Teknik Şartnameler, Ankara, 2020.

[11] TSE, İnşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcı malzemeler için agregalar, TS EN 13242+A1, Ankara, 2009.

[12] TSE, Bağlayıcısız karışım-Özellikler, TS EN 13285, Ankara, 2018.

[13] TSE, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- Deval), TS EN 1097-1, Ankara, 2011.

[14] TSE, Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler - Bölüm 3: "sonnenbrand bazalt" için kaynatma deneyi, TS EN 1367-3, Ankara, 2003.

[15] Oritola, S., Saleh, A. L., Sam, A. R. M., Comparison of different forms of gravel as aggregate in concrete. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 6(2), 135-144, 2014.

[16] USGS, USGS Publishes Map of Potential Pyrrhotite Occurences, <https://www.usgs.gov>, 2020, Erişim tarihi: 22.06.2022.

[17] Morata, M., Saborido, C., Fontserè, V., Slag aggregates for railway track bed layers: Monitoring and maintenance. Computers in Railways XV Railway Engineering Design and Operation, 283-294, 2016.

[18] Texas DOT, Ballasted Track Construction, Special Specification 2350, CSJ 0054-07-069, 2004.

[19] Union Pacific, Railroad Track Construction, General Conditions and Specifications, Section 34 11 10, 2019.

[20] Elkhoury, N., Hitihamillage, L., Moridpour, S., & Robert, D., Degradation prediction of rail tracks: A review of the existing literature. The Open Transportation Journal, 12(1), 2018.

[21] ARTC, Earthworks, Formation and Capping Material, Engineering (Track & Civil), Standard, ETM-08-01, 2010.

[22] Türköz, M., Sıkıştırılmış Şişen Killerin Mikroyapısal Değişiminde Şişme-Büzülme Çevrimin Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(1), 77-91, 2009.

[23] Kaya, A. O., Esnek üstyapıların aşınma tabakasında elektrik ark fırını cürufunun agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2014.

[24] Ali, N. A., Chan, J. S., Papagiannakis, T., Theriault, E. G., Bergan, A. T., The use of steel slag in asphaltic concrete. In Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance. ASTM International, 1992.



- [25] Abut, Y., Elektrikli Ark Ocağı Cürufu'nun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 230-240, 2013.
- [26] Özügürlü, B., Karayolu esnek üstyapı binder tabakasında elektrik ark ocağı cürufunun yapay agregaya kullanımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2015.
- [27] Mutlugeldi, C., Elektrik ark fırını cürufunun karayolu esnek üstyapı bitümlü temel tabakasında agregaya değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2015.
- [28] Liapis, I., Likoydis, S., Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, 907-918, 2012.
- [29] Yılmaz, M., Kök, B. V., . Effects of ferrochromium slag with neat and polymer modified binders in hot bituminous mix, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 16-5, 310-318, 2009.
- [30] Xue, Y., Wu, S., Hou, H., Zha, J., Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of hazardous materials*, 138(2), 261-268, 2006.
- [31] Rastovčan-Mioč, A., Sofilić, T., Mioč, B., Application of electric arc furnace slag. *Proceedings matrib Vela luka, island Korčula, Hrvatska*, 24-26, 2009.
- [32] Li, Y., Wang, R., Li, S., Zhao, Y., Qin, Y., Resistance of recycled aggregate concrete containing low-and high-volume fly ash against the combined action of freeze-thaw cycles and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 166, 23-34, 2018.
- [33] Aiban, S. A., Utilization of Steel Slag Aggregate for Road Bases, *Journal of Testing and Evaluation*, Mar. 2006, Vol. 34, No. 2, Paper ID JTE12683, 2006.
- [34] Sofilić, T., Merle, V., Rastovčan-Mioč, A., Čosić, M., Sofilić, U., Steel slag instead natural aggregate in asphalt mixture. *Archives of metallurgy and materials*, 55(3), 657-668, 2010.
- [35] Kehagia, F., Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management & Research*, 27(3), 288-294, 2009.
- [36] Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L., Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of hazardous materials*, 209, 84-91, 2012.
- [37] Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L., Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of hazardous materials*, 209, 84-91, 2012.
- [38] Pasetto, M., Baldo, N., Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3458-3468, 2011.
- [39] Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., Barry, M. S., Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and building*



materials, 17(2), 105-112, 2003.

[40] Shiha, M., El-Badawy, S., Gabr, A., Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag. *Construction and Building Materials*, 248, 118710, 2020.

[41] Yonar, F., Elektrik ark ocağı çelikhane cürufunun karayolu esnek üstyapı tabakalarında kullanımının ve karışım performansının araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, (2017).

[42] Gökalp, İ., Uz, V. E., Pürüzlendirme Uygulamasının Kaplama Yüzeyi Makro Dokusu Üzerine Olan Etkisinin Araştırılması. *Celal Bayar University Journal of Science*, 13(2), 545-554, 2017.

[43] Pan, D. A., Li, L., Tian, X., Wu, Y., Cheng, N., Yu, H. , A review on lead slag generation, characteristics, and utilization. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 140-155, 2019.

[44] Özbebek, H., Açık, H., İnce agregalarda yapılan metilen mavisi ve kum eşdeğerliği deney sonuçlarının beton özelliklerine ve maliyetine etkisi. *THBB Beton*, 2011.

[45] Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., Plizzari, G., Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. *Composites Part B: Engineering*, 90, 195-202, 2016.

[46] Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M., Wan, J., Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 93, 911-918, 2015.

[47] Khan, M. I., Wahhab, H. A. A., Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag. *Construction and Building Materials*, 12(4), 195-201, 1998.

[48] Haritonovs, V., Zaumanis, M., Brencis, G., Smirnovs, J., Performance of asphalt concrete with dolomite sand waste and bof steel slag aggregate. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 8(2), 91-97, 2013.

[49] Liapis, I., & Papayianni, I., Advances in chemical and physical properties of electric arc furnace carbon steel slag by hot stage processing and mineral mixing. *Journal of hazardous materials*, 283, 89-97, 2015.

[50] Papachristoforou, M., Anastasiou, E. K., Papayianni, I., Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 262, 120569, 2020.

[51] Maghool, F., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Mohajerani, A., Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness. *Soils and Foundations*, 59(5), 1591-1601, 2019.

[52] Aziz, M. M. A., Shokri, M., Ahsan, A., Liu, H. Y., Tay, L., Muslim, N. H., An overview on performance of steel slag in highway industry. *Journal of Advanced Research in Materials Science*,



67(1), 1-10, 2020.

[53] Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y. J., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(4), 949-958, 2017.

[54] Sas, W., Głuchowski, A., Radziemska, M., Dziecioł, J., Szymański, A., Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure. *Materials*, 8(8), 4857-4875, 2015.

[55] Fronek, B. A., Feasibility of expanding the use of steel slag as a concrete pavement aggregate, M. Sc. Thesis, Cleveland State University, USA, 2012.