

İŞLENMİŞ EAO ÇELİKHANE CÜRUFUNUN TMA TASARIMINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Fatih YONAR¹ Savaş Nedim TUTAN² Muhammet KOMUT² Şenol ALTIOK³

ÖZET

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

2020 yılında ülkemizde 26 elektrik ark ocaklı (EAO), 8 indüksiyon ocaklı ve 3 bazik oksijen fırınlı (BOF) çelik fabrikası olmak üzere toplamda 37 çelik üretim tesisi bulunmaktadır. Aynı yılın istatistikleri doğrultusunda ülkemizde bir yılda 35,8 milyon ton çelik üretilmiştir. Bu üretim miktarı ile ülkemiz dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır. Bu çalışma kapsamında işlenmiş EAO cürufunun Taş Mastik Asfalt (TMA) tabakasında yapay agregada olarak kullanımı hedeflenmiştir. Çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri incelenmiş ve karışım tasarımları gerçekleştirilmiştir. Gerek fiziksel özellikler gerekse karışım parametreleri bakımından elde edilen sonuçlar ve karşılaşılan sorunlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, öne çıkan değerlendirmeler ve çalışmanın gelecek planı, Sonuçlar ve Öneriler bölümünde sunulmuştur.

GİRİŞ

Türkiye dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır. Bu kapasite iki farklı üretim biçimiyle elde edilmektedir. Bu üretim biçimlerinden entegre çevrimde; demir cevheri ana ham madde olarak kullanılmaktadır. Elektrik çevriminde ise hurda metal ham madde olarak kullanılmaktadır (Fontini, 2009). Ülkemizdeki üretimin %77’si elektrik ark ocaklarına (EAO) aittir (SGM, 2013).

Halihazırda Türkiye’de 37 tesis faaliyet göstermektedir. Bu tesislerin 10 tanesi Akdeniz Bölgesi’nde, 9’u Marmara Bölgesi’nde, 8’i Ege Bölgesi’nde, 7’si Karadeniz Bölgesi’nde ve 3’ü İç Anadolu Bölgesi’nde bulunmaktadır. Bu tesislerin 3’ü entegre, 8’i indüksiyon ocağı ve kalan 26 tesis EAO’dur.

-
1. Dr. Öğr. Gör., ÇOMÜ, Mühendislik Fakültesi, İnş. Mühendisliği Bölümü, Çanakkale
 2. Yüksek Mühendis, KGM, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara
 2. Mühendis, KGM, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara

EAO'da üretilen her ton çelikte 120 ila 150 kg arasında çelikhane cürufu elde edilmektedir (Dikbaş, 2011). EAO tesislerinin mevcut kapasitesine göre tam üretimde yıllık 3 milyon ton çelikhane cürufunun ortaya çıkması olasıdır. EAO çelikhane cürufu, uluslararası literatürde yan ürün olarak kabul edilmekte ve yapay agrega olarak özellikle karayolu inşaatında kullanılmaktadır.

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

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

Bu çalışma kapsamında Tosyalı-Harsco Geri Dönüşüm A. Ş. tarafından işlenen Tosçelik EAO çelikhane cürufu, doğal agrega yerine ikame olarak TMA tabakasında kullanılmıştır. İlk olarak alınan numunelerin karayolu inşaatında bağlayıcı tabakalarda yapay agrega olarak kullanımına ilişkin temel deneyler yapılmış ve sonuçlar Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca değerlendirilmiştir. İkinci olarak EAO çelikhane cürufunun çevresel etkileri irdelenmiş ve son bölümde MS-2 Marshall dizayn metodu ile üretilen TMA briketlerinin parametreleri yine Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca incelenmiştir.

MALZEME VE METOT

Bu bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır. İlk alt bölümde numunelerin fiziksel özellikleri incelenmiş, fiziksel özellikler Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca değerlendirilmiştir.

İkinci alt bölümde ise EAO çelikhane cürufunun çevresel etkisi irdelenmiştir.

Üçüncü alt bölümde, EAO çelikhane cürufu kullanılarak MS-2 Marshall dizayn metodu ile üretilen TMA briketlerinin parametreleri, Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 limitleri uyarınca incelenmiştir.

Malzeme

Bu çalışma kapsamında Osmaniye'deki Tosçelik EAO tesisinden numune alınmıştır. Çelikhane cürufu, koyu gri renkte, sert, pürüzlü ve göreceli olarak poroz yapıdadır (Şekil 1). Bu çalışmada kullanılan çelikhane cürufu, manyetik ayırıştırma, kırma, eleme ve bir dizi özel işlemten geçirilmiştir.



Şekil 1: Çelikhane cürufu genel görünüş (Anh ve Gia, 2019).

Fiziksel Özellikler

Kaba agrega numunelerine TS EN 1097-6 standardı kapsamında su absorpsiyonu ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deney üç kere tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar, ortalama değer ile Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Kaba Agrega Özgül Ağırlık ve Su Absorpsiyonu Değerleri.

Numune No:	1	2	3	Ortalama
Zahiri Özgül Ağırlık:	3,681	3,658	3,716	3,685
Hacim Özgül Ağırlık:	3,474	3,448	3,551	3,491
Su Absorpsiyonu (%):	1,6	1,7	1,3	1,5

Tablo 2’de görüldüğü üzere EAO çelikhane cürufu su absorpsiyonu değeri, göreceli olarak kimi mineral agregaların üzerindedir. Bu durum cürufun gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Sıvı cürufun, su ile soğutulması sırasındaki yüksek sıcaklık farkı, cüruf içerisinde bulunan gazların uzaklaşmadan içeride hapsolmasına neden olabilmektedir. Bu gazların oluşturduğu odacıklar da gözenekli yapının asıl sebebi olarak tanımlanmaktadır.

İnce agrega numunelerine TS EN 1097-6 standardı kapsamında su absorpsiyonu ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deney altı kere tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar, ortalama değer ile Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3: İnce Agrega Özgül Ağırlık ve Su Absorpsiyonu Değerleri.

Numune No:	1	2	3	4	5	6	Ortalama
Zahiri Özgül Ağırlık:	3,820	3,825	3,843	3,856	3,802	3,793	3,823
Hacim Özgül Ağırlık:	3,618	3,631	3,644	3,661	3,650	3,642	3,641
Su Absorpsiyonu (%):	1,5	1,4	1,4	1,4	1,1	1,1	1,3

Tablo 3’te görüldüğü üzere, tane boyutu küçüldükçe özgül ağırlık değeri artmakta, su absorpsiyonu değeri düşmektedir. Özgül ağırlık değerlerindeki düşüşün, geçirimsiz boşlukların, ince taneler içerisinde daha nadir gözlemlenmesinden, su absorpsiyonundaki düşüşün de yine benzer şekilde gözeneklerin ince tanelerde daha az olmasından kaynaklandığı kanaatine varılmıştır.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; TMA’ da kullanılacak kaba ve ince agrega için %2 su absorpsiyonu limiti verilmiştir (KGM, 2013). Tablo 2 ve 3 incelendiğinde çelikhane cürufunun yeterli özelliğe sahip olduğu görülmektedir..

Dikkate alınması gereken bir diğer husus da cürufun özgül ağırlık değerlerinin yüksek olmasıdır. Bu durumun, cürufun ekonomik taşıma mesafesini kısaltacağı ve ağırlıkça karışıma katılacak bağlayıcı miktarını arttıracak düşünülmemektedir.

Mineral filler numunelerine TS EN 1097-7 standardı kapsamında özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deney iki kere tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar, ortalama değer ile Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4: Mineral Filler Özgül Ağırlık Değerleri.

Numune No:	1	2	Ortalama
Zahiri Özgül Ağırlık:	3,795	3,821	3,808

Numunelere TS EN 1097-2 standardı uyarınca Los Angeles parçalanma direnci deneyi yapılmıştır. Deney iki kere tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar, ortalama değer ile Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5: Parçalanma Direnci Deney Sonuçları.

Numune No:	1	2	Ortalama
Parçalanma Oranı (%):	24,1	23,0	23,6

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 kapsamında; TMA için %25 parçalanma direnci limiti tanımlanmıştır. Tablo 5’te görüldüğü üzere numune, şartnamede belirtilen limiti sağlamaktadırlar.

Numunelere Nicholson metodu (TS EN 12697-11) uyarınca soyulma mukavemeti deneyi yapılmıştır. Yapılan deneylerde soyulma mukavemeti değerinin Karayolu Teknik Şartnamesi 2013’te belirtilen %60 limitinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Teragrip AN ve Teragrip ANG katkılarının kullanılmasına karar verilmiştir. Söz konusu katkılar %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında kullanılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6: Soyulma Mukavemeti Deney Sonuçları.

Katkı Maddesi Oranı:	%0,2	%0,3	%0,4
Teragrip AN	50-55	70-75	80-85
Teragrip ANG	50-55	70-75	80-85

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda %0,4 oranında Teragrip AN katkısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Çevresel Etki

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

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

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

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

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

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

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

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

17.06.2011 tarih ve 27967 sayılı Resmi Gazete ile yürürlüğe giren Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanmıştır. Bu bağlamda halihazırda tehlikesiz ve inert atıklarla ilgili önemli mevzuatlardan birisi söz konusu tebliğdir (BTAGKT, 2011). Tebliğin Ek-2 listesinde; tebliğin kapsamında

olmayan atık kodları sunulmuştur. Bu atık kodları arasında İşlenmemiş Cüruf (100202) atık kodu yer almamaktadır. Dolayısıyla EAO üretiminden kaynaklanan cüruf lar söz konusu tebliğ kapsamında yer almaktadır.

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

Cüruf un yeniden kullanımı, sağlıklı biçimde uzaklaştırılmasını sağlamakta ve kullanıldığı alanda doğal kaynakların hammadde olarak tüketilmesini azaltmaktadır. Bu yönleriyle cüruf ların yeniden kullanımı çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır. Ancak cüruf ların kullanılacağı alana bağlı olarak çevreye olabilecek etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu alanda yapılan bazı çalışmalar aşağıda aktarılmıştır. Amerikan Ulusal Cüruf Birliği (NSA) tarafından çelikhane cüruf larının yeniden kullanımından kaynaklanabilecek riskler kötü durum senaryosu yaklaşımıyla hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda çelikhane cüruf larının anılan biçimlerde kullanımının halk ve çevre sağlığı açısından anlamlı bir risk içermediği bildirilmiştir (NSA, 1998).

Bu çalışmayla ilgili temel sonuçlar şu şekildedir:

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

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

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

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

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

EAO cüruf larının karayolu inşaatında agrega olarak kullanımındaki olası çevresel etkileri konusunda yapılan laboratuvar çalışmaları bulunmaktadır. Bu doğrultuda özellikle cüruf un çevreye olan zehirlilik etkisini ölçmek üzere ekotoksikite analizleri

yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçlarına göre EAO cürüfları tehlikesiz yan ürün kategorisinde değerlendirilmektedir (Sofilic, Mladenovic, & Sofilic, 2010).

Çelikhane cürufunun inşaat uygulamalarında kullanılabilmesi için bünyesinde bulunan ve genişlemeye neden olan serbest CaO ve MgO bileşiklerinin hidrate edilmesi bir başka deyişle yaşlandırılması gerekmektedir.

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

Karışım Tasarımı

Çelikhane cürufu ile TMA tasarımı, MS-2 Marshall dizayn metoduna göre yapılmıştır. Tane dağılımı için Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'te TMA için tanımlanmış olan granülometri aralığındaki ideal eğri esas alınmıştır. Toplam üç farklı tasarım yapılmış ve çelikhane cürufunun kullanımı, TMA için optimize edilmeye çalışılmıştır. Çelikhane cürufunun doğal agregaya nazaran yüksek özgül ağırlığı dikkate alınarak karışımlarda en az 1.300 gr çelikhane cürufu kullanılmıştır. Yüksek özgül ağırlık aynı zamanda karışıma agrega ağırlığı oranınca dahil olan bitüm miktarını da arttırmaktadır. Süzülmeyi engellemek amacıyla karışımlar 145°C-150°C aralığında sıkıştırılmıştır.

Birinci tasarımda; 1.300 gr çelikhane cürufu kullanılmış, gerçekleştirilen Schellenberger süzülme deneyinde 145°C sıkıştırma sıcaklığında (TS EN 12697-18) %0,35 elyaf katkısının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Bağlayıcı oranları %4,5 ila %6,5 arasında 15 briket üretilmiştir. Üretilen briketlerin yüksekliği hedeflenen 63,5mm'nin altında kalmış ve ortalama olarak 58,2mm ölçülmüştür ve ikinci tasarımın yapılmasına karar verilmiştir.

İkinci tasarımda; 1.450 gr çelikhane cürufu kullanılmış, gerçekleştirilen Schellenberger süzülme deneyinde 150°C sıkıştırma sıcaklığında (TS EN 12697-18) %0,35 elyaf katkısının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Bağlayıcı oranları %5 ila %7 arasında 15 briket üretilmiştir. Yüksek bağlayıcı oranına sahip karışımlar, sıkıştırma için 145°C sıcaklığa kadar bekletilirken süzülme gözlemlenmiş ve üçüncü tasarımın yapılmasına karar verilmiştir.

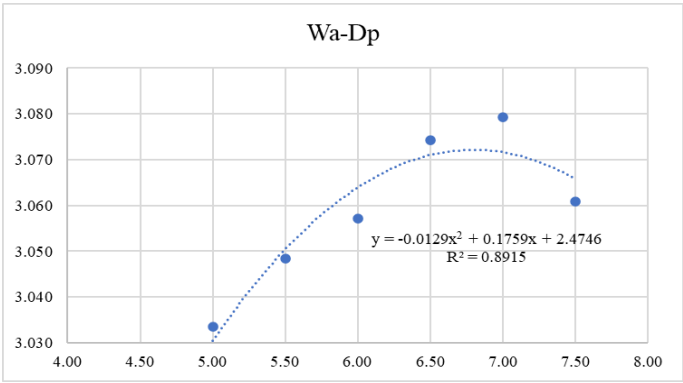
Üçüncü tasarımda; 1.450 gr çelikhane cürufu kullanılmış, 145°C sıkıştırma sıcaklığı esas alınmış ve %0,7 oranında elyaf karışıma eklenmiştir. Bağlayıcı oranları %5 ila %7,5 arasında 18 briket üretilmiştir. Üçüncü tasarıma ilişkin sonuçlar Tablo 7'de

sunulmuştur.

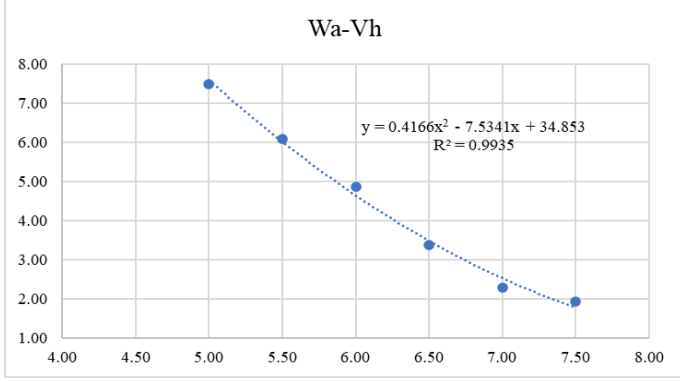
Tablo 7: Üçüncü Tasarım Sonuçları.

W _a (%)	H _o	D _p	D _t	V _h	VMA	VFA
5,00	65,7	3,033	3,279	7,50	19,67	61,86
5,50	65,1	3,048	3,246	6,09	19,66	69,03
6,00	64,8	3,057	3,213	4,86	19,81	75,44
6,50	64,1	3,074	3,182	3,38	19,73	82,86
7,00	63,9	3,079	3,151	2,28	19,98	88,59
7,50	64,0	3,061	3,121	1,94	20,83	90,70

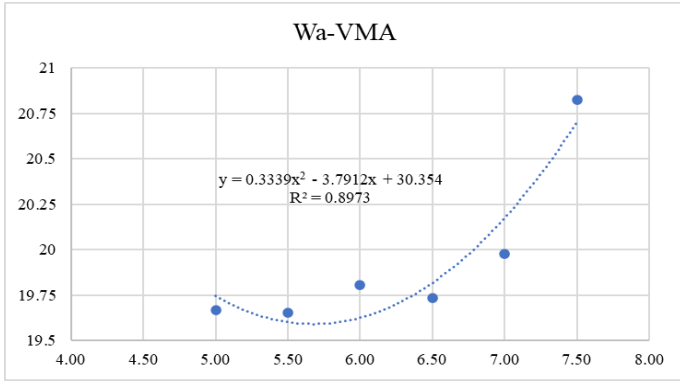
Tablo 7’de verilen sonuçların grafikleri çizilmiş ve Şekil 2, 3, 4 ve 5’te sunulmuştur.



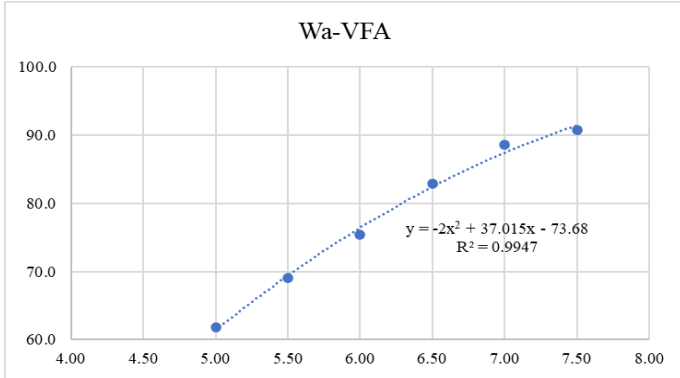
Şekil 2: Bağlayıcı Oranı - Pratik Yoğunluk Grafiği.



Şekil 3: Bağlayıcı Oranı – Boşluk Oranı Grafiği.



Şekil 3: Bağlayıcı Oranı – Agregalar Arası Boşluk Grafiği.



Şekil 3: Bağlayıcı Oranı – Bağlayıcı ile Dolu Boşluk Grafiği.

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'te TMA tasarımı için hava boşluğu %2-%4 aralığında, agregalar arası boşluk (VMA) ise minimum %16 olarak tanımlanmıştır. Bu kısıtlar ve yukarıda sunulan sonuçlar kapsamında optimum bağlayıcı oranının belirlenebilmesi için %3 boşluk oranı hedeflenmiştir. Türetilen eğilim çizgileri

yardımla elde edilen teorik sonuçlar Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8: Teorik Tasarım Sonuçları.

W_a (%)	Elyaf (%)	D_p	D_t	V_h	VMA	VFA
6,70	0,7	3,074	3,171	3,08	19,94	85,54

Tablo 8’de belirtildiği üzere çelikhane cürufu ile yapılan TMA tasarımında, optimum bağlayıcı oranı (W_a) %6,70, boşluk oranı (V_h) %3,08 ve agregalar arası boşluk oranı (VMA) %19,94 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Karayolu Teknik Şartnamesi 2013’te tanımlanan limitlere uymaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EAO çelikhane cürufu, uluslararası literatürde yan ürün olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde granüler tabakalarda yapay agrega olarak kullanılmakla birlikte potansiyeli olan böyle bir yan ürünün bitümlü sıcak karışımlarda kullanım yolunun da açılması, cürufun kullanımını destekleyecektir. Bu çalışma kapsamında cürufun temel fiziksel özellikleri incelenmiş, literatür kapsamında çevresel değerlendirmesi yapılmış ve MS-2 Marshall dizayn metoduna göre TMA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve sonuçlara ilişkin öneriler aşağıda sunulmuştur.

EAO çelikhane cürufunun özgül ağırlığının yüksek olması, karışıma ağırlıkça katılacak olan bağlayıcı miktarını arttırmaktadır. Karışımındaki bağlayıcı miktarının artmasının, performans sonuçlarını etkileyebileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla öngörülen teorik sonuçların, üretimle irdelenmesi ve farklı boşluk oranları ile dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izinde oturma deneylerinin yapılması planlanmaktadır. Farklı boşluk oranları ile dahi yeterli dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izinde oturma değerlerinin elde edilememesi durumunda, çelikhane cürufunun doğal agrega ile karıştırılarak da kullanılması değerlendirilmektedir.

Cürufun soyulma mukavemeti değerlerinin istenilen limitlere çekilebilmesi için katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddesine ek ya da bağımsız olarak hidrolik kireç ve sönmüş kirecin, soyulma mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Yapılan literatür taramasında EAO çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılması durumunda su kaynakları açısından bir tehlike oluşturmadığı, halk ve çevre sağlığı açısından bir risk içermediği, içerisindeki metallerin besin zinciri içinde birikmediği belirlenmiştir.

Tasarım programına, çelikhane cürufu ile yapılacak aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları da eklenmiştir.

Bu çalışma kapsamında EAO çelikhane cürufunun yapay agrega olarak bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabileceği ve çevresel açıdan bir etkisinin olmamasının yanı sıra ülkemize ekonomik katkı sağlayacağı kanaatine varılmıştır.

Bu çalışma “Çelikhane Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yapay Agrega Olarak Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması” adlı (KGM ARGE 2019-5) projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. ADDDY, (2010). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmî Gazete. Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.
2. Anh, Tu & Gia, Huan & Nguyen, Huynh & Nguyen, Khanh-Son. (2019). Characterization of Carbonated Steelmaking Slag And Its Potential Application in Construction. Vietnam Journal of Science and Technology. 57. 61. 10.15625/2525-2518/57/3A/14078.
3. ASA, (2002). A Guide to the Use of Iron and Steel Slag in Roads. Wollongong/Australia: Australasian Slag Association.
4. AYGEİY, (2008). Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik, 05.07.2008 tarih 26927 sayılı Resmî Gazete. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.
5. BTAGKT, (2011). Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği, 17.06.2011 tarih ve 27967 sayılı Resmî Gazete. Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı.
6. DÇÜD, (2011). Türk Demir Çelik Sektörü. Mayıs 2011 tarihinde Demir Çelik Üreticileri Derneği: <http://www.dcud.org.tr> adresinden alındı.
7. Dikbaş, A., Timur, S., Yücel, O., Görgün, E., İyınam, A.F., Ertürk, M.C., Çalışkan, E. (2011). Elektrik Ark Fırını Çelik Tesislerinde Üretilen Çelik Cürufunun Dolgu, Temel ve Alttemel Olarak Kullanımına İlişkin Teknik Rapor.
8. EXPONENT, (2007). Human Health and Ecological Risk Assessment for the Environmental Applications of Steel-Making Slag: An Update. Prepared for Steel Slag Coalition Kelley Drye Collier Shannon 1050 K Street, NW Suite 400 Washington, DC 20007-5108. Prepared by Exponent 320 Goddard, Suite 200 Irvine, California 92618 August 2007.
9. Fontini, K. (2009). Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates, Waste Manag. Res. 27, 288-294.
10. Fronek, B. A. (2011). Feasibility of Expanding the Use of Steel Slag as a Concrete Pavement Aggregate, MSci Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Cleveland State University, USA.
11. KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi.
12. NSA, (1998). Steelmaking Slag: A Safe and Valuable Product. Washington: The Steel Slag Coalition- National Slag Association.
13. Pasetto, M., Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace slags, Journal of Hazardous Materials, 181, 938-948
14. Pasetto, M., & Baldo, N. (2011). Construction and Building Materials. pp. 3458-3468.
15. SGM (Sanayi Genel Müdürlüğü), (2013). Demir Çelik Sektörü Raporu, 2013/1
16. Sofilic, T., Mladenovic, A., & SOFILIC, U. (2010). Characterization Of The EAF Steel Slag As Aggregate For Use In Road Construction. Sisak, Croatia.
17. Yonar, F., (2017). Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının Ve Karışım Performansının Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.