

Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı

Altan YILMAZ*
İlhan SÜTAŞ**

ÖZ

Bu çalışmada, Antalya'da faaliyet gösteren ETİ Ferrokrom İşletmesi'nden yan ürün olarak ortaya çıkan ve atıl durumdaki endüstriyel atıkların (Elektrik ark fırını cürufunun) yol üstyapısının temel tabakalarında, doğal agregalar yerine alternatif kullanım imkanı araştırılmıştır.

Deneysel çalışmaların ağırlıklı olduğu araştırmada, temel tabakasını temsilen hazırlanan bağlayıcı içermeyen granüler karışımlar üzerinde CBR ve Proctor deneyleri, bağlayıcı içeren karışımlar üzerinde ise serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Neticede, ferrokrom cüruflarının fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından yol üstyapısının granüler tabakalarında, doğal agregaya alternatif olarak kullanılabilmesi, çimento gibi bir bağlayıcı ile stabilize edilen cüruf karışımlarının yüksek trafik hacmine sahip karayolları için iyi bir stabilizasyon temel alternatifi oluşturabileceği belirlenmiştir.

ABSTRACT

Use of Ferrochromium Slag as Highway Base Material

This study deals with the research of the use of the Ferrochromium slag (Electric-Arc furnace slag) in base layer material of road pavements. These materials were examined whether they are used for flexible pavement base layer aggregates instead of natural aggregates (limestone) or not.

In this study, laboratory tests were carried out on the prepared specimens to represent the base course layers. CBR and Proctor tests were carried out on unbounded granular material mixtures and unconfined compression test were carried out on bounded mixtures.

Consequently, it is concluded that Ferrochrome slag is used for granular layers of road pavements instead of natural aggregates in point of its physical and mechanical characteristics and slag mixtures stabilized with cement constitute a good alternative to

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11.12.2006 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2008 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta - altan_y@yahoo.com

** Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya - isutas@yahoo.com

stabilized base layers of pavements with high traffic volume highways with regard to its satisfying strength.

1. GİRİŞ

Son 20-25 yıldır dünya çapında, endüstriyel atıkların giderek artması ve atık imha yöntemlerinin işletmelere büyük maliyetler getirmesi, bu atıkların değişik üretim süreçlerinde değerlendirilmesini yaygınlaştırmıştır. Bilhassa yüksek fırın cürüfları günümüzde atık bir madde olmaktan çıkıp ekonomik değeri olan bir ara ürün haline gelmiştir. Avrupa başta olmak üzere, yurtdışında metalürjik cüruf'un hemen hemen tamamı yeniden kullanılmaktadır.

Karayolu tabakalarının yapımı için gerekli olan kaliteli doğal agregaların temini giderek zorlaşmaktadır. Çünkü, merkezi hükümetin yeni düzenlemeler getirmesi nedeniyle ve yerel yönetimlerin daha bilinçli davranması neticesinde taş ocaklarının açılması ve işletilmesi giderek daha sıkı kurallara tabi olmaktadır. Ayrıca, yerleşim birimlerine yakın olan mevcut ocaklarda ve dere yataklarında kaliteli malzemenin tükenmeye başlaması nedeniyle, yerleşim birimlerine daha uzak bölgelere yönelme söz konusudur. Bu durum nakliye maliyetlerinin giderek artmasına neden olmakta ve global yapım maliyetlerini de etkilemektedir. Kaliteli ve kısmen maliyetli olan doğal agregaları daha verimli kullanma gerekliliği ortadadır. Bu nedenle, kütleli miktarda yapı malzemesi gerektiren, yol inşaatı gibi yapım işlerinde endüstriyel atıklar (ikincil agregalar) kullanılarak doğal kaynaklarımızın verimli kullanılmasına katkı sağlanabilir.

Yol inşasında kullanılabilen endüstriyel atıklar sıralanacak olursa; Yüksek fırın cürufu, Uçucu kül, İnşaat ve yıkım atıkları, Sökülmüş beton yol kaplamaları, Sökülmüş asfalt yol kaplamaları ve Gübre fabrikası atıkları (fosfojips) başta gelmektedir. (2, 3, 4, 5)

Bu çalışmaya konu olan cüruf türü ise Ferrokrom (FeCr) cürufudur. Bu cüruf, elektrik-ark fırınlarında ısıl işlem görmüş olan metalürjik bir cüruftur ve demir-çelik işletmelerinin yüksek fırın cürüfları ile oluşum açısından benzerlik göstermektedir. Metalürjik cüruflar sınıfında "Ferrous slag" diğer bir deyişle "Demir-alaşımı cürüfları" alt sınıfına dahildir.

Türkiye'de iki yerde endüstriyel boyutta Ferrokrom cürufu çıkmaktadır. Bunlardan birisi Antalya Ferrokrom İşletmesi, diğeri ise Elazığ Ferrokrom İşletmesidir. Çıkan cürufların hemen hemen tamamı stok alanlarında depolanmakta olup günümüze kadar bu cürufların ciddi anlamda değerlendirilmesi söz konusu olmamıştır [1].

Bu çalışmada, Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin atık cüruflarının, yol üstyapısının temel tabakalarında bir bağlayıcı ile birlikte veya bağlayıcısız olarak kullanılabilirliği, deneysel yöntemler kullanılarak araştırılmıştır.

2. CÜRUF LARIN ÖZELLİKLERİ, KULLANIM ALANLARI

Ferrokrom, genellikle paslanmaz ve ısıya dirençli çelik üretiminde kullanılan bir metal bileşimidir. Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufu ise ferrokrom üretimi yapan tesislerin elektrik-ark fırınlarından proses sonucu açığa çıkan atık malzemelerdir.

Ferrokrom ve Silikoferrokrom üretimi esnasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar SiO₂ metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur ve bu cüruf kalıplara dökülerek alınır (Şekil.1).

Cürufların soğutulma şekilleri farklı olduğu için sahip oldukları özellikler de farklıdır. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olurlar. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik gösterir ve çoğunlukla agrega olarak kullanılır. Yüksek fırından çıktığında eriyik halinde olan cüruf hızlı olarak soğutulduğu takdirde ise akışkanlığındaki ani azalma kristalleşmeyi engeller ve camsı yapıda bir katı madde elde edilmesini sağlar. Bu yarı-kararlı camsı malzeme, bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Bu tür cüruflar daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılır. [6, 11].



Şekil 1. FeCr cürufu çelik potalardan alınırken

Antalya'daki Ferrokrom cürufları, havada yavaş soğumaya bırakıldığı için kristal yapıdadır ve aktif değildir. Bu cüruf türü "Havada soğutulmuş elektrik ark fırını cürufu" (EAF cürufu) olarak adlandırılmaktadır ve çoğunlukla agrega olarak kullanıma uygundur. Kırılıp elendiği zaman fiziksel özellikleri diğer agregalara göre üstünlük göstermektedir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, pürüzlü ve boşluklu (poroz) bir yüzeye sahip olması nedeniyle iyi adezyona sahip olması üstün özelliklerindedir. Diğer taraftan cürufun su absorpsiyonu boşluklu yapısı nedeniyle yüksektir [7].

Antalya'daki işletmeden bir yılda yaklaşık 35.000 bin ton Ferrokrom (FeCr) cürufu, 10.000 ton Silikoferrokrom (SiFeCr) cürufu çıkmaktadır. Çıkan cürufların hemen hemen tamamı stok alanlarında depolanmaktadır [1]. Açık alanda depolanan cüruflar aynı zamanda çevresel kirlilik ve görüntü kirliliği oluşturmaktadır.

Günümüzde cüruflar genellikle demiryolu balastı olarak, beton agregası ve asfalt agregası, olarak, yol temel ve alt temel malzemesi olarak, çimento sanayiinde, briket ve tuğla yapımında, cüruf yünü ve prefabrik elemanların yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [2, 4, 8, 9].

Yol yapımında cüruf kullanımının geçmişi çok eski zamanlara, Roma İmparatorluğu dönemine kadar gitmektedir. Demir cürufu M.Ö. 4.yy başlarında meşhur Appia yolunun

Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı

yapımında bazı katmanlarda kullanılmıştır. İlk demir cürufu üretimi ise 1848'de Avustralya'da Mittagong şehrinde yapılmıştır. Daha yakın zamanlara bakılacak olursa modern demir cürufunun, yaklaşık kırk yıldır yol yapımında kullanıldığı görülecektir. Hız yollarında ve ağır trafikli yollarda dahi cüruf kullanımı başarılı sonuçlar vermiştir [10, 7, 3].

Ülkemizde ise cürufların yol inşaatında kullanımı konusunda daha çok Demir-Çelik İşletmeleri'nin yüksek fırın cürufları ve bakır cürufları üzerine çalışmalar yapılmıştır [13, 14, 15, 16]. Bu cüruf atıklarının bir takım kullanım alanları bulunmaktadır. Ferrokrom cüruflarının ülkemizdeki kullanım oranı ve kullanım amacı konusunda ise yapılan literatür araştırmalarında kaydedeğer bir çalışmaya rastlanmamıştır.

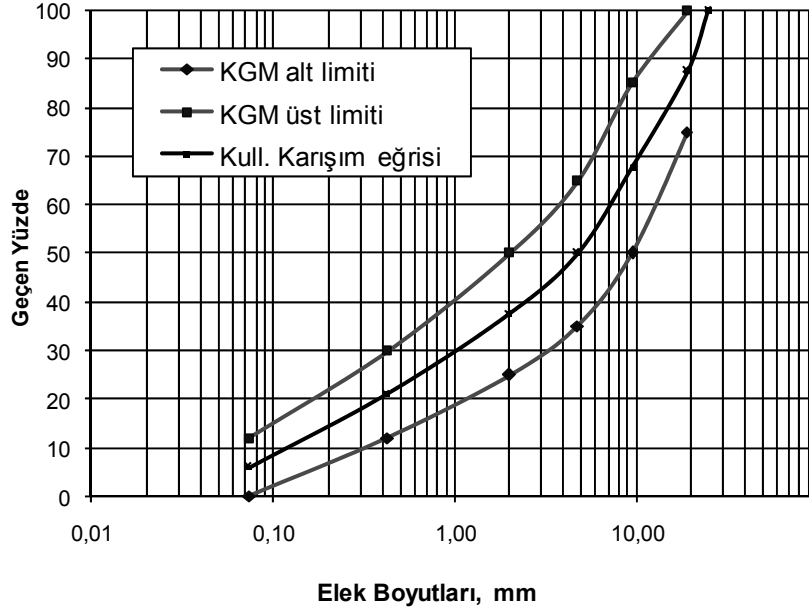


Şekil 2. Havada soğutulmuş kırma-cüruf ile yol inşaatı çalışması

3. MALZEME ve KARIŞIM ÖZELLİKLERİ

Mineral Agregası: Çalışmada kullanılan tanık doğal agregası Antalya Hurma mevkiinden temin edilen kalker kökenli kırılmış agregasıdır.

Karışımlarda kullanılan agregası ve cüruf gradasyonu KGM'nin granüler temel tabakaları için önerdiği Tip C gradasyondur [17]. Burada max tane büyüklüğü 25 mm ve No.4 elekten geçen malzeme miktarı %50'dir. Şekil 3.'de gradasyon eğrisi verilmiştir.



Şekil 3. Kullanılan agrega tane büyüklüğü dağılımı

Cürufaların Deneye Hazırlanması: Granülometri bakımından FeCr cürufu, doğrudan üstyapıda kullanıma uygun değildir. Malzemeyi kapalı gradasyon elde edilecek şekilde (Şekil.3'de görülen) uygun tane büyüklüğüne getirmek için bir kısmının kırma-eleme işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla iri boyutlu cürufular kırıcıdan geçirilerek kullanıma uygun boyuta getirilmiştir.

Çizelge 1. Malzemelerin özgül ağırlıkları ve su absorpsiyon değerleri

Özellik	İndis / birim	FeCr cürufu	SiFeCr cürufu	Doğal Agregası
İri agrega hacim özgül ağırlığı	G_{kb} , gr/cm^3	2,862	2,766	2,698
İri agrega zahiri özgül ağırlığı	G_{ka} , gr/cm^3	3,066	2,824	2,725
İri agrega su absorpsiyonu	P %	2,32	0,74	0,37
İnce agrega hacim özgül ağırlığı	G_{ib} , gr/cm^3	3,148	2,780	2,646
İnce agrega zahiri özgül ağırlığı	G_{ia} , gr/cm^3	3,119	2,787	2,716

Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı

FeCr cürufunun su absorpsiyonu diğer malzemelere oranla yüksek çıkmıştır. Bu durum FeCr cürufu tanelerinin boşluklu yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) şartnamelerine göre iri agreganın su absorpsiyonu %2,5'dan küçük olmalıdır, dolayısıyla şartname sınırı aşılmamıştır [17].

Silis Dumanı: Yüksek oranda (%85-90) amorf SiO₂ içeren Silis dumanı gri renkli bir baca tozudur, ortalama tane çapı itibariyle çimento taneciklerinden 100 kat daha ince bir malzemedir. Özgül yüzeyi 20.000 m²/kg civarındadır. Yığın birim ağırlığı ise 150-250 kg/m³ civarındadır [18]. Silis dumanı, Antalya Ferrokrom işletmesinden temin edilmiştir ve bu çalışmada çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

3.1. Los Angeles Aşınma Dayanımı

Agregaların aşınma direncinin tespiti için Los Angeles dönel tamburunda ilgili deney standardına uygun olarak deney uygulanmıştır. Aşınma deneyi Doğal agrega, Ferrokrom cürufu ve Silikoferrokrom cürufu için ayrı ayrı yapılmış, sonuçlar Çizelge.2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

Aşınma Yüzdesi		
Ferrokrom cürufu	Silikoferrokrom cürufu	Doğal agrega
18,58	14,03	21,2

KGM şartnamelerine göre temel tabakasında kullanılacak olan malzemenin Los Angeles aşınma kaybı maksimum %40 olmalıdır. Aşınma tabakası için ise maksimum kayıp %30 olmalıdır [17]. Çizelge.2'deki aşınma değerleri incelendiğinde cürufların Los Angeles aşınma kaybının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Doğal agregaya kıyasla, FeCr cürufu için aşınma direnci %14 daha yüksek çıkmıştır.

3.2. Donma-Çözülme Dayanımı

Agregaların sodyum sülfat çözeltisine daldırılması ve takiben etüvde kurutulması yolu ile periyodik işleme maruz bırakılan agregaların termal bozunma özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

TS EN 1367-1 deney standardına göre yapılan donma-çözülme deneyi sonucunda bulunan değerler Çizelge.3'de verilmiştir.

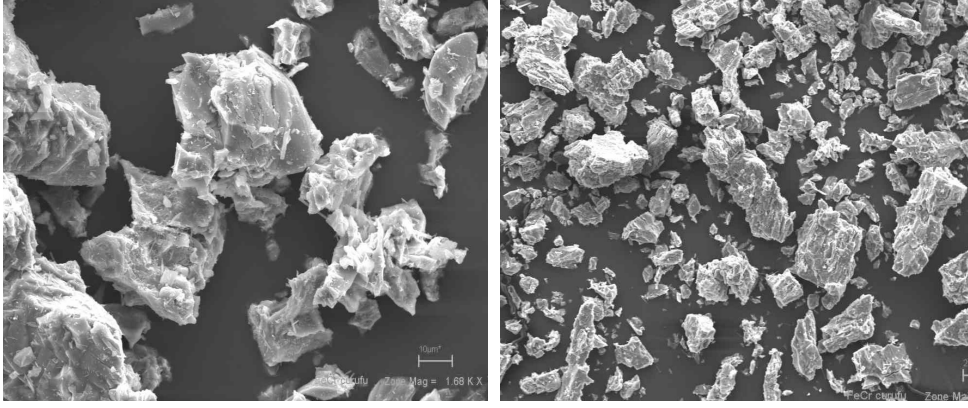
Çizelge 3. Sodyum-Sülfat deneyi sonuçları

Donma Çözülme Kaybı (%)		
Ferrokrom cürufu	Silikoferrokrom cürufu	Doğal agrega
4,122	3,255	5,410

KGM şartnamelerine göre temel tabakasında kullanılacak olan malzemenin Na₂SO₄ (sodyum-sülfat) çözeltisi ile donma-çözülme kaybı maksimum %15 olmalıdır. Çizelge.3'den de görüldüğü gibi her üç malzemenin de donma-çözülme dayanımı oldukça yüksektir.

3.3. SEM (Elektron Mikroskobu) Görüntüleri

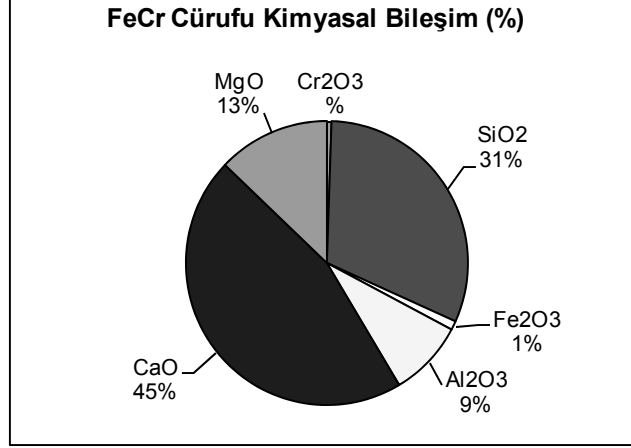
Çalışmada kullanılan cürufların Akdeniz Üniversitesi SEM (Elektron mikroskobik görüntü analizi) cihazından alınan görüntüleri Şekil 4.'de verilmiştir.



Şekil 4. FeCr cüruflu'nun SEM görüntüsü; Solda 1680 kez, sağda 400 kez büyütülmüş hali

3.4. Kimyasal Kompozisyon

FeCr cürufunun Antalya ETİ Elektrometalurji A.Ş.'den alınan kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, dört ana elementin hâkim olduğu görülmektedir. Bunlar; Silisyum, Magnezyum, Alüminyum ve Kalsiyum bu elementler oksitler halinde cürufun yaklaşık % 95'ini oluşturmaktadır (Bkz. Şekil.5). Bunlara ek olarak çok az miktarda demir ve krom bulunmaktadır. Cüruf içerisinde organik madde bulunmamaktadır.



Şekil 5. FeCr cürufunun kimyasal kompozisyonu

4. UYGULANAN DENEYLER

Deneyle, bağlayıcı içeren karışımlar ve bağlayıcı içermeyen karışımlar olmak üzere iki grupta ele alınmıştır.

Bağlayıcı içermeyen karışımlar, Şekil.3'de görülen gradasyon oranına sahip %100 cüruf ve %100 doğal agrega karışımdan oluşmaktadır. Bu karışımların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, kompaksiyon (Proctor) deneyleri ve CBR deneyleri uygulanmıştır.

Bağlayıcı içeren karışımlar ise "Cüruf+bağlayıcı" ve "Doğal agrega+bağlayıcı" şeklinde hazırlanmıştır. Buradaki ana malzemelerin (Cüruf ve doğal agrega) gradasyonları da Şekil.3'deki dağılıma sahiptir. Bağlayıcı olarak farklı oranlarda Çimento, Kireç ve Silis dumanı kullanılmıştır. Bağlayıcı oranları ana malzemeye, kuru karışımın ağırlıkça yüzdesi cinsinden (%2-4-6-8-10) ilave edilmiştir. Bu numuneler üzerinde Tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

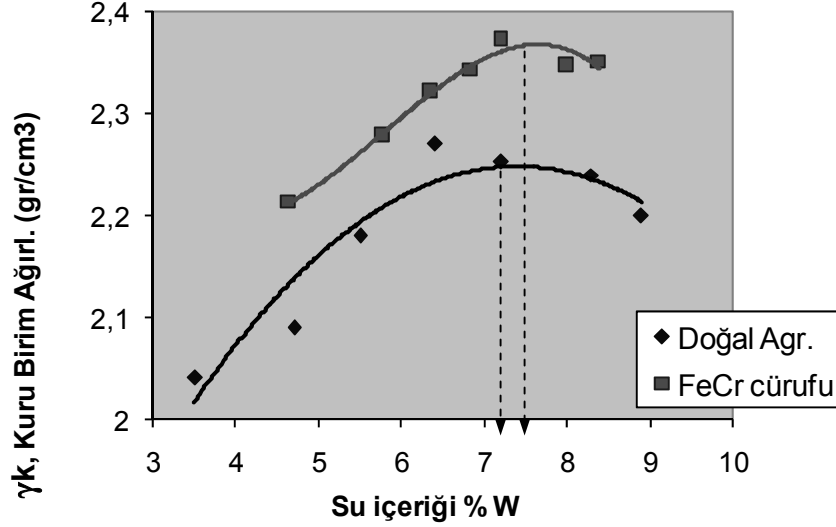
4.1. Proctor Deneyi

Malzemelerin "Kuru Birim Ağırlık - Su İçeriği" ilişkisi standart Proctor deneyi ile tayin edilmiştir. (2,5 kg. tokmak, 30,5 cm. düşme yüksekliği ve her tabakaya 25 darbe) Sonuçta Max. Kuru Birim Hacim Ağırlık (mg/m^3) ile Optimum Su İçeriği (%) bulunmuştur. CBR deneyinde kullanılacak olan optimum su muhtevası da burada belirlenmiştir.

Kohezyonsuz granüler malzemeler için Proctor deneyi her zaman iyi sonuç vermeyebilir bu sebepten dolayı Proctor deneyinin yanı sıra vibarasyonlu sehpa ile sıkıştırma yapılarak da kompaksiyon deneyi uygulanmıştır.

Standart Proctor enerjisi ile 10×20 cm'lik kalıplarda 5 tabaka halinde yapılan sıkıştırma deneyi sonucunda bulunan Proctor eğrisi Şekil.6'da görülmektedir.

Cürufun birim ağırlığı doğal agregadan daha büyük olduğu için bu fark Proctor deneyi sonuçlarında da görülmektedir. Optimum su muhtevası her iki malzeme için de %7.5 civarında çıkmıştır. Maksimum kuru birim ağırlık ise FeCr cürufu için $2,38 \text{ gr/cm}^3$, doğal agrega için $2,25 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.



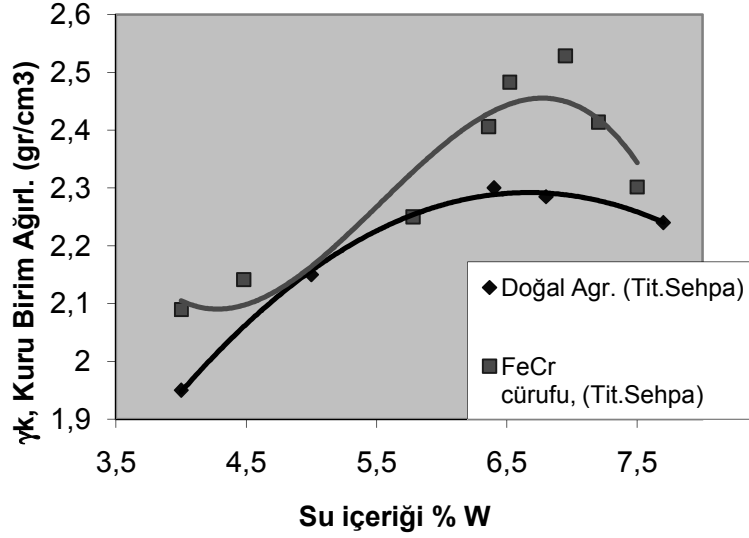
Şekil 6. FeCr cürufunun ve doğal agreganın Proctor eğrileri

Titreşimli sehpa üzerinde, belirli bir sürşarj yükü ile 5 tabaka halinde yapılan sıkıştırma deneyi sonucunda bulunan kuru birim ağırlık-su içeriği değerleri ise Şekil.7'de görülmektedir.

Optimum su içeriği her iki malzeme için de %7 civarında çıkmıştır. Maksimum kuru birim ağırlık ise FeCr cürufu için $2,46 \text{ gr/cm}^3$, doğal agrega için $2,30 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur. Kompaksiyon deneylerinde titreşimli sehpa ile sıkıştırma yönteminin granüler malzemeler için daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu yöntem daha düşük su içeriğinde daha yüksek birim ağırlık elde edilmesini sağlamıştır.

4.2. Yük Taşıma Kapasitesi

Yük Taşıma Kapasitesi ile ilgili olarak en çok bilinen laboratuvar deneyi CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyidir. Bununla birlikte serbest basınç mukavemeti deneyi de uygulanan deneylerden birisidir. Bağlayıcısız karışımlarının yük taşıma kapasitesi CBR deneyi ile hidrolik bağlayıcı içeren karışımlarının yük taşıma kapasitesi ise serbest basınç mukavemeti deneyi ile belirlenmiştir.



Şekil 7. FeCr cürufunun ve doğal agreganın titreşimli sehpa ile bulunan birim ağırlık - su içeriği grafikleri

4.2.1. CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) Deneyi:

Çalışmada doğal agrega ve Ferrokrom cürufu üzerinde CBR deneyleri uygulanmıştır. Numuneler standart Proctor enerjisi ve titreşimli sehpa olmak üzere iki farklı yöntemle sıkıştırılmış ve CBR deneyine tabi tutulmuştur. Bu sayede sıkıştırma yönteminin sonuçlar üzerindeki etkisi de görülebilmektedir.

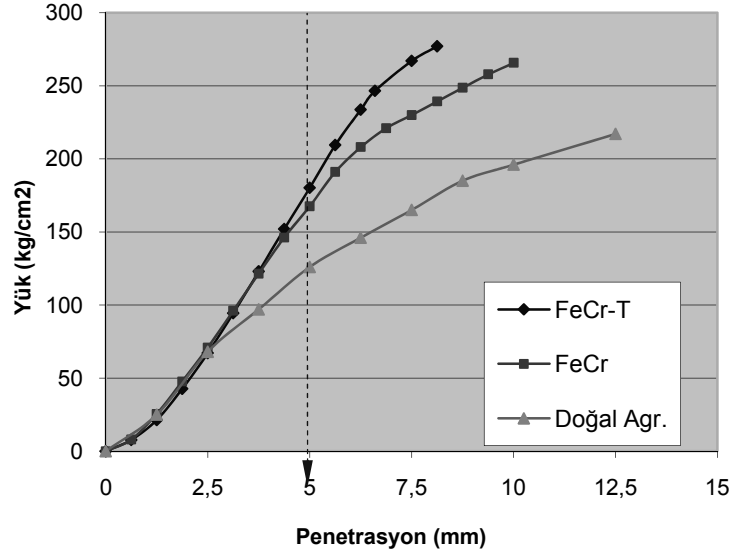
CBR değeri bulunacak malzemeye, önce kompaksiyon deneyi uygulanmış ve optimum su muhtevası bulunmuştur daha sonra CBR deneyine geçilmiştir. Deneyler ASTM D 1883 standardına göre yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge.4'de, yük-penetrasyon grafikleri ise Şekil.8'de verilmiştir.

Çizelge 4. CBR deneyi bulguları

Malzeme İndisi	Sıkıştırma yöntemi	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	CBR (%)
FeCr	Standart Proctor	2,318	160
FeCr-T	Titreşimli Sehpa	2,352	172
Doğal Agr.	Standart Proctor	2,270	120

KGM şartnamelerine göre temel tabakasında kullanılacak olan malzemenin CBR değeri en az %100 olmalıdır. Yukarıdaki tabloda ve aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi ferrokrom

cürufunun CBR değeri öngörülenin oldukça üstündedir. Doğal agregaya kıyasla CBR değeri %33 daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 8. Malzemelerin yük - penetrasyon grafiği

Titreşimli sehpa üzerinde, titreşim yardımı ile ve belirli bir sürşarj yükü altında, sıkıştırılan numunelerin CBR değeri ve birim hacim ağırlık değerleri daha yüksek çıkmıştır. CBR değerleri, standart Proctor enerjisi ile (tokmakla) sıkıştırılan numunelere kıyasla %8 daha yüksek çıkmıştır. Bu da göstermektedir ki kullanılan cüruf malzemesi ve uygulanan gradasyon için en uygun sıkıştırma yöntemi titreşimli sehpa ile sıkıştırmadır. Bu saptamadan sonraki aşamalarda numuneler hazırlanırken sadece titreşimli sehpa ile sıkıştırma uygulanmıştır.

4.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti (Tek Eksenli Basınç Deneyi)

Tek eksenli basınç deneyinde, silindirik bir numunenin yenilmesi anında birim alana etkiyen yük bulunmaktadır. Bir bağlayıcı ile karıştırılarak hazırlanan kohezyonlu numunelerin serbest basınç dayanımlarının bulunması için bu deney uygulanmıştır.

FeCr cürufu ve doğal agreganın ayrı ayrı çimento, kireç ve baca tozu gibi bağlayıcılarla karıştırılması ile hazırlanan numuneler test edilmiştir.

Serbest basınç deneyi için üretilen silindir numunelerde standartların belirttiği şekilde yükseklik/çap oranı 2 olan ve numune çapı D_{max} 'ın 4 katı genişliğinde olan (R:10 cm, H:20 cm olan) numuneler kullanılmıştır.

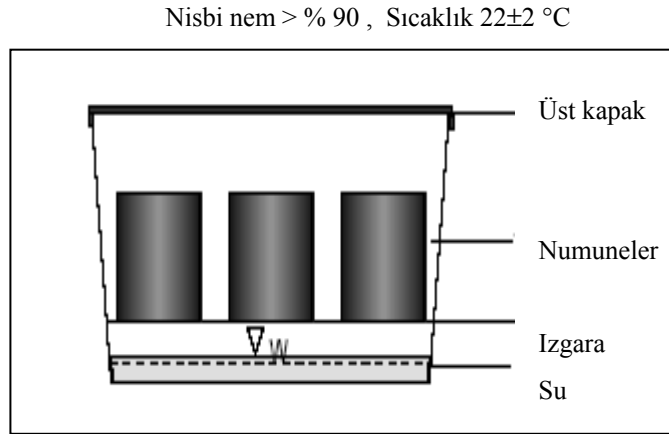
Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı

Numunelerin Hazırlanması: Karışımlar, tane büyüklüğüne göre sınıflanmış olan 6 farklı fraksiyonun, Şekil.3'deki gradasyon eğrisine göre karıştırılması ile elde edilmiştir. Bu sayede karışımlar homojen bir dağılıma sahip olmakta ve numunelerin nihai mukavemetine etkiyebilecek muhtemel gradasyon farklılıkları ve aşırı sapmalar önlenebilmektedir.

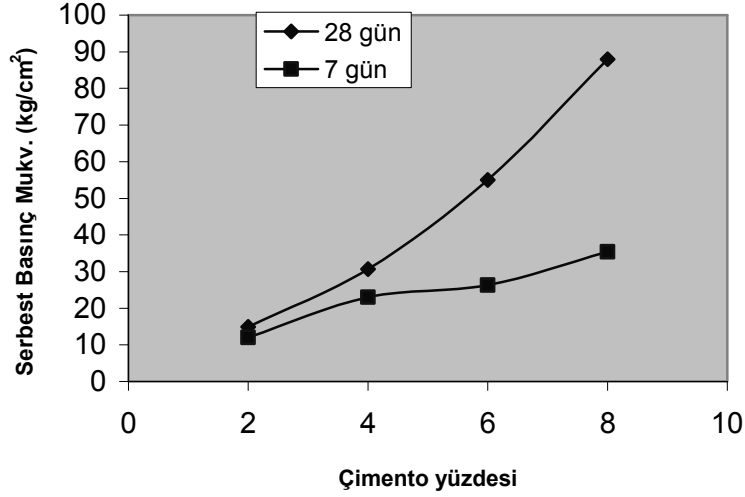
Hazırlanan kuru karışıma belirli oranda bağlayıcı malzeme eklendikten sonra mekanik karıştırıcıda üniform hale gelene kadar karıştırılır. Daha sonra karışıma Proctor yöntemi ile belirlenen optimum su miktarı (%7) , ağırlıkça yüzde olarak eklenir. Karışım silindirik şeklindeki ayrılabilir gövdeli çelik kalıplara (10cm/20cm) yerleştirilir ve 5 tabaka halinde titreşimli sehpa üzerinde, 2,5 kg sürşarj yükü altında sıkıştırılır. Karışım, prizini alması için 24 saat kalıp içinde bekletildikten sonra kalıp vidalarından açılır ve numune çıkartılır. Numuneler min. %90 nemli kür odasında, su seviyesinden 10 cm yukarıda bulunan ızgara üzerinde kür'e bırakılır. Kullanılan kür ortamının şematik resmi Şekil.9'da görülmektedir.

Kür süresi sonunda (7 ve 28 gün) numuneler çıkartılarak ağırlığı, boyu, çapı ölçülerek serbest basınç deneyine geçilir. Serbest basınç dayanımı deneyi ASTM-D2166 deney standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 0,5 mm/dk. olarak alınmıştır.

Doğal agrega+çimento ile üretilen 7 ve 28 günlük numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları Şekil.10'da görülmektedir.

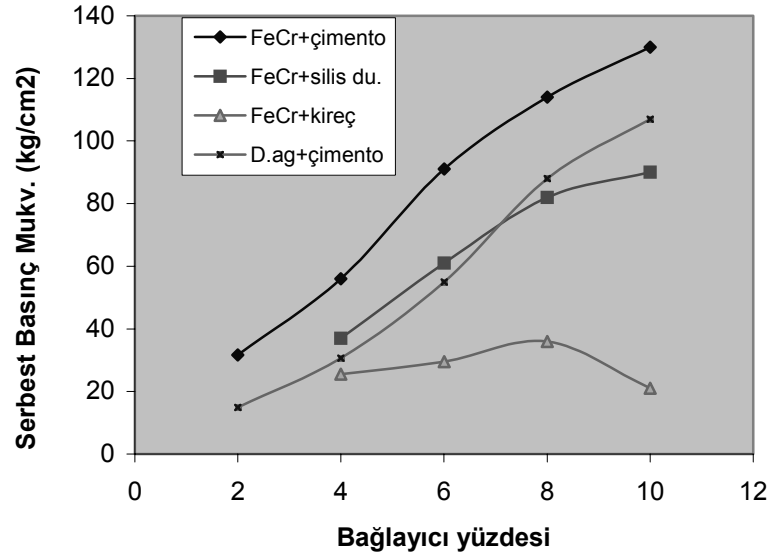


Şekil 9. Numunelerin içinde bulunduğu nemli kür ortamı



Şekil 10. Doğal agreganın 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları

Farklı bağlayıcılar (çimento, kireç, silis dumanı) ile üretilen FeCr cürufu numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımları Şekil.11’de görülmektedir.



Şekil 11. Farklı bağlayıcılar ile üretilen FeCr cürufu numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımları

5. DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

- Granulometri bakımından, FeCr cürufunu kapalı gradasyon elde edecek şekilde uygun tane büyüklüğüne getirmek için kırma-eleme işleminden geçirilmesi gerekmiştir. Bu işlem ekstra bir enerji harcanması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla cürufu şartnameler gereği kırılmış agrega kullanılması gereken yerlerde kullanmak, doğal agrega ile rekabet edebilmesi açısından uygun olacaktır.
- Aşınma değerleri incelendiğinde cürufunların Los Angeles aşınma kaybının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Doğal agregaya kıyasla, FeCr cürufunun aşınma direnci %15 daha yüksek çıkmıştır. Bu durum ağır trafik yükleri altında dahi cürufunların tane büyüklüğü dağılımının (gradasyonun) değişmeyeceğini göstermektedir.
- Donma bölgesindeki malzemeler için su absorpsiyonu kritik bir parametredir. Yüksek oranda su absorbe eden agregalar donma-çözülme periyotları sonucunda, suyun donarken genişmesi sebebiyle, parçalanmakta ve başlangıç gradasyonları değişmektedir. FeCr cürufunun su absorpsiyonu boşluklu yüzey yapısı nedeniyle bir miktar yüksek çıkmıştır. Ancak, bu değer şartnamelerin öngördüğü (% P < 2,5) limitlerin altında kalmıştır.
- İklimsel etkilere karşı dayanım, özellikle gece-gündüz ısı farkının yüksek olduğu karasal iklim bölgelerinde önem arz etmektedir. Hızlandırılmış donma-çözülme deneyinde doğal agregaya kıyasla, cürufunların donma-çözülme dayanımı %31 daha yüksek çıkmıştır.
- Cürufun birim ağırlığı doğal agregadan daha yüksek olduğu için bu fark Proctor deneyi sonuçlarına da yansımıştır. Optimum su muhtevsındaki kuru birim ağırlık cürufalarda daha yüksek çıkmıştır. Optimum su muhtevası her iki malzeme için de %7 - 7.5 arasında bulunmuştur. Kompaksiyon deneylerinde titreşimli sehpa ile sıkıştırma yönteminin granüler malzemeler için daha başarılı olduğu görülmüştür. Daha düşük su muhtevasında daha yüksek birim ağırlık elde edilmesini sağlamıştır.
- FeCr cürufunun kuru CBR değeri oldukça yüksek çıkmıştır. Şartnamede en iyi temel malzemesi olarak verilen kırma kayanın CBR değerinden %60, doğal agregadan %33 daha yüksek değer elde edilmiştir. Burada, cüruf tanelerinin kristal yapısı nedeniyle köşeli ve keskin yüzeylere sahip olması etkili olmaktadır. Bu keskin ve köşeli yüzeylerin numunede iç sürtünmeyi artırıcı bir etki yaptığı anlaşılmaktadır. SEM analizi görüntülerinde, belirtilen morfolojik yapı net olarak görülmektedir (Şekil 4).
- Serbest basınç dayanımları açısından bakıldığında; Cüruf+çimento ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımları, doğal agregaya kıyasla oldukça yüksek çıkmıştır. %4 ve üzerindeki bağlayıcı miktarı, cüruf+çimento karışımları için serbest basınç dayanımları standartlarını sağlamaktadır (Şekil 11). KGM standartlarına göre çimento bağlayıcılı temel tabakası için sağlanması gereken serbest basınç dayanımı 35-55 kg/cm² dir.
- Çimentodan sonra Silis dumanı da etkili bir bağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Cüruf+Silis dumanı karışımları için %6 ve üzerindeki bağlayıcı miktarları serbest basınç dayanımları açısından yeterli dayanımı vermektedir.
- Kireç katkısı ile üretilen karışımların basınç dayanımları ise oldukça düşük çıkmıştır. Kireç'in deneylerde kullanılan cüruf malzemesi ve uygulanan karışım gradasyonu için etkili bir bağlayıcı olmadığı anlaşılmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, FeCr cüruflarının fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından yol üstyapısının granüler tabakalarında (temel tabakalarında), doğal agregaya alternatif olarak kullanılabilmesi, ayrıca, hidrolik bir bağlayıcı ile stabilize edilen cüruf karışımlarının oldukça yüksek dayanımlara sahip olması sebebiyle yüksek trafik hacmine sahip karayolları için iyi bir stabilizasyon temel alternatifi oluşturabileceği belirlenmiştir.

FeCr cüruflarının agrega olarak kullanılabilmesi için gerekli olan kırma-eleme işleminin maliyeti ayrı bir girdi olarak dikkate alınmalıdır.

Yol inşaatında kullanılacak olan atık cürufların kirlilik konsantrasyonları da belirlenmelidir. Atık malzeme, içerisinde çevresel kirlenici bulunduruyorsa, oluşturacağı kirlilik konsantrasyonu belirlenen standart seviyelerin daima altında olmalıdır [19, 20]. Ferrokrom cürufları yaklaşık 1200 °C’de ısıl işleminden geçtiği için içerisinde organik madde bulunmamaktadır. Dolayısıyla yalnızca inorganik çıktılar için kirlilik analizleri uygulanması yeterlidir.

Teşekkür

Yazarlar, “Elektrik Ark Fırını Cürufunun Karayolu Üstyapısında ve Yol Dolgularında Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Verimlilik Analizi” adlı Araştırma Projesini destekleyen Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına teşekkürlerini sunarlar.

Semboller

CBR: California Bearing ratio (Kaliforniya taşıma oranı)

FeCr: Ferrokrom (Demir-krom alaşımı)

SiFeCr: Silikoferrokrom

KGM: Karayolları Genel Müdürlüğü

TS: Türk Standartları

SEM: Scanning Electron Microscopes (Elektron mikroskobu taraması)

Kaynaklar

- [1] Yılmaz, A., Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2002.
- [2] Schroeder, R.L., The Use of Recycled Materials in Highway Construction. Public Roads, 58(2): 32-41, 1994.
- [3] Ramaswamy, S. D. and Aziz, M. A., Some Waste Materials in Road Construction, Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction, pp. 153-165, Hilary Inyang and Kenneth Bergeson, American Society of Civil Engineers, NY, 1992.

Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı

- [4] Ahmed, I., Use of Waste Materials in Highway Construction, Noyes Data Corporation, Park Ridge USA, 1993.
- [5] Katherine H. ve Eighmy T. T., Scanning European Advances in the Use of Recycled Materials in Highway Construction, Scanning Trip Summary Report. USA, 2000.
- [6] Stevenson, J., Slag Characterization and Utilization, Research Experience, Langston University, Langston OK, 1997.
- [7] Ramirez T.L., Steel Slag Aggregate in Bituminous Mixtures, Final Report, Pennsylvania Department of Transportation, 1992.
- [8] Arm, M., Mechanical Properties of Residues As Unbound Road Materials, KTH Land and Water Resources Engineering, Doctorate Thesis, Stockholm, 2003.
- [9] Hill, A.R., Dawson, A.R., Mundy, M., Utilisation of Aggregate Materials in Road Construction and Bulk Fill, Resources Conservation and Recycling 32, 305–320, 2001.
- [10] Australasian Slag Association, Road & Traffic Authority,, “A Guide to the Use of Slag in Roads”, 24 pp., Australia, 1993.
- [11] Proctor, D.M., Et al., Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace Basic Oxygen Furnace and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags, Environment Science and Technology 34 (8): pp: 1576-1582, 2000.
- [12] Pioro, L.S., Pioro, I.L., Reprocessing of Metallurgical Slag into Materials for the Building Industry, Waste Management 24, pp: 371–379, 2004.
- [13] Ilıcalı, M., Karayolu Üst Yapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, 1988.
- [14] Varlıorpak, Ç., Tanyel, S. ve Eren, A., Yol Üst Yapımında Cüruf Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 129-139 s, Ankara, 1995.
- [15] Yıldırım, B., Kuloğlu N., Ergani Bakır İşletmeleri Reverber Cürufunun Yol Üst Yapısının Temel ve Alt Temel Tabakalarında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 255 - 265 s, Ankara, 1993.
- [16] Akyiğit, M., Ergani Bakır İşletmeleri Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 1992.
- [17] Yollar Fenni Şartnamesi (Yol Alt Yapısı, Sanat Yapıları, Köprü, Tünel ve Üst Yapı İşleri). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını: 170/2, 435 ss, Ankara, 1994.
- [18] Yeğinoğlu, A., Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 149-167 s, Ankara, 1993.
- [19] Lind, B.B., Fallman, A.M., Larsson, L.B., Environmental Impact of Ferrochrome Slag in Road Construction, Waste Management 21, 255-264, 2001.
- [20] Mroueh, UM, P. Eskola, and J. Laine-Ylijoki, Life-Cycle Impacts of the Use of Industrial By-Products in Road and Earth Construction, Waste Management 21, 271-277, 2001.