

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİVAS DEMİR - ÇELİK FABRİKASI CÜRUFUNUN
YOL STABİLİZASYONUNDA KULLANILMASININ
ARAŞTIRILMASI

Mustafa Ethem KIZIRGİL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

114309

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

114309

ELAZIĞ

2001

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİVAS DEMİR - ÇELİK FABRİKASI CÜRUFUNUN
YOL STABİLİZASYONUNDA KULLANILMASININ
ARAŞTIRILMASI

Mustafa Ethem KIZIRGİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez/...../ 2001 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oy Birliği /Oy Çokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

Danışman	Üye	Üye
Yrd.Doç.Dr.Taner ALATAŞ	Doç.Dr.Necati KULOĞLU	Prof. Bekir YILDIRIM

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../ 2001 tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****SİVAS DEMİR – ÇELİK FABRİKASI CÜRUFUNUN YOL
STABİLİZASYONUNDA KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI**

Mustafa Ethem KİZİRGİL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2001, Sayfa : 47

Bu çalışmada, demir- çelik fabrikalarında yan ürün olarak çıktıktan sonra atılan cürufun, yol stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Cüruf, yüksek fırınlarda sıcak maden üretimi sırasında cevherin demir dışındaki bileşenleri ile eritme işlemi için ortama eklenen maddelerin, madenden ayrılarak oluşturdukları maddedir. Çıkan cürufun çok az bir kısmı granüle cüruf haline getirilerek değerlendirilmektedir. Geriye kalan kısmı atıl olarak depolanmaktadır.

Zemin-çimento stabilizasyonu, zemine belirli bir oranda çimento katılarak, sertleşme başlamadan önce optimum su içeriğinde, maksimum yoğunluk elde edilinceye kadar sıkıştırılmasıdır. Üniversite kampüsünde yapılmakta olan bir bina temel kazısından alınan zemin ile, zemin-çimento ve zemin-çimento-cüruf karışımları üzerinde bir dizi deneyler yapıldı. Sonuç olarak, stabilizasyon amacıyla zemine çimento katıldığında, zeminin mukavemetinin arttığı, çimentonun belli bir kısmının yerine cüruf kullanılması durumunda bu değere yakın mukavemetlerin elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca yapılan ekonomik analize göre, çimentonun belli bir kısmının yerine cüruf kullanılması durumunda gerekli mukavemetlerin daha ekonomik şartlarla elde edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Cüruf, Stabilizasyon, Zemin.

ABSTRACT

MASTERS THESIS
THE INVESTIGATION OF USING SIVAS IRON-STEEL FACTORY'S
SLAG IN ROAD STABILIZATION

Mustafa Ethem KIZIRGİL

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department Civil Engineering

2001, Page: 47

In this study, the waste slag at the iron-steel factories was investigated to use on road stabilization. Slag is a waste material which is obtained during the production of hot mine in blast furnaces. The small part of slag is used as granule. The rest are stored as waste material.

Soil-cement stabilization, is compress soil by mixing at a certain rate cement until the max density is operated with optimum water rate before stiffen is started. Many experiments were made with the mixture of soil-cement-slag, soil- cement and soil taken from the foundation of a building at the University campus. As a result, it was found that when the cement was added to soil, the strength of soil was increased, and also when a small amount in of slag was used place of cement, a close strength would be obtained. According to the economic analysis, the necessary strengths could be gained more economically by this way.

Key Words: Slag, Stabilization, Soil.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi ile ilgili çalışmalarında, gerekli yardım, teşvik, destek ve ilgisinden dolayı danışman hocam Yrd.Doç.Dr.Taner ALATAŞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım deneysel çalışmalara yardımlarıyla katkıda bulunan, Müh. Fak. İnşaat Bölümü teknisyeni Seyfettin ÇİÇEK' e ve Teknik Bilimler M.Y.O. İnşaat Programı teknisyeleri Zeynel DEMİROL ve Ethem DEMİR' e teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet.....	I
Abstract.....	II
Teşekkür	III
İçindekiler	IV
Tablolar Listesi	VI
Şekiller Listesi	VII
Fotoğraflar Listesi.....	VIII
Semboller.....	IX
 1. GİRİŞ	 1
 2. GENEL BİLGİLER	 3
2.1. Zemin – Çimento Stabilizasyonu.....	4
2.2. Yüksek Fırın Cürufu	8
2.2.1. Cürufun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	10
2.2.2. Cürufun Kullanım Alanları	12
2.2.3. Ülkemizde Cüruf Üretimi ve Değerlendirilmesi	15
 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	 17
3.1. Stabilizasyonda Kullanılan Malzemeler	18
3.2. Yapılan Deneyler	19
3.2.1. Elek Analizi Deneyi	19
3.2.2. Zemin Danelerinin Özgül Ağırlıklarının Ölçümü	22
3.2.3. Likit Limit ve Plastik Limit Tayini	22
3.2.4. Standart Procktor Deneyi	24
3.2.5. Serbest Basınç Mukavemetinin Ölçümü	31
3.2.6. Islatma- Kurutma Deneyi	35
3.2.7. Donma- Çözülme Deneyi	37

4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE EKONOMİK ANALİZ.....	39
4.1. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	39
4.2. Çimento İle Cürufun Ekonomik Analizi.....	40
4.2.1. Çimento Maliyeti	40
4.2.2. Cüruf Maliyeti.....	41
4.2.3. Aynı Mukavemeti Veren Zemin-Çimento ve Zemin-Çimento- Cürufun Ekonomik Karşılaştırılması.....	44
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	47



TABLOLAR

Sayfa

Tablo 2.1. Amerikan Standart Eleklerine Göre, Zemin – Çimento Stabilizasyonuna Uygun Zemin Granülometrisi Sınır Değerleri	5
Tablo 2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu (%)	11
Tablo 3.1. Sivas Demir- Çelik Fabrikası Cürufunun Kimyasal Analizi	18
Tablo 3.2. Elazığ Çimento Fabrikasında Üretilen PKÇ/B-32,5 R Çimentosunun Özellikleri	18
Tablo 3.3. Deneylerde Kullanılan Zeminin Elek Analizi Sonuçları ve Sınır Değerleri	21
Tablo 3.4. Zemine Uygulanan Procktor Deneyi Sonuçları	25
Tablo 3.5. Değişik Karışımlar İçin Serbest Basınç Mukavemeti ve Standart Procktor Deneyi Sonuçları	28
Tablo 3.6. Islatma – Kurutma Deneyi Sonuçları	36
Tablo 3.7. Donma Çözülme Deneyi Sonuçları	37

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Demir – Çelik fabrikalarında cürufa ait akış diyagramı	9
Şekil 3.1. Deneylerde Kullanılan Zeminin Granülometri Eğrisi	21
Şekil 3.2. Zeminin Procktor Eğrisi	25
Şekil 3.3. Çeşitli Çimento Oranları İçin Optimum Su İçerikleri Eğrisi.....	29
Şekil 3.4. Çeşitli Çimento Oranları İçin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları Eğrisi.....	29
Şekil 3.5. Değişik Oranlardaki Karışımların Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklarının Cüruf ve Çimento ile Değişimi.....	30
Şekil 3.6. Değişik Oranlardaki Karışımların Optimum Su İçeriklerinin Cüruf ve Çimento ile Değişimi.....	30
Şekil 3.7. Zeminin Serbest Basınç Mukavemetinin Çimento İle Değişimi	33
Şekil 3.8. Değişik Oranlardaki Karışımların Serbest Basınç Mukavemetlerinin Cüruf ve Çimento ile Değişimi.....	33
Şekil 3.9. Islatma – Kurutma Deneyi Sonuçları	36
Şekil 3.10. Donma – Çözülme Deneyi Sonuçları.....	38

FOTOĞRAFLAR

	<u>Sayfa</u>
Resim 3.1. Elek Analizi Deney Seti	20
Resim 3.2. Zemin Numunesinin Dane Büyüklüğüne Göre Ayrılmış Hali ve Cürufun 80 Nolu Elekten Elenmiş Hali	20
Resim 3.3. Su İçeriği Deneyinde Numunelerin Etüvden Çıktıktan Sonraki Görünümü	24
Resim 3.4. Numunelerin Otomatik Kompaktör ile Sıkıştırılması	26
Resim 3.5. Numunelerin Kür Havuzundaki Görünümü	32
Resim 3.6. Serbest Basınç Mukavemeti Ölçümü	34
Resim 3.7. Serbest Basınç Mukavemeti Ölçümünde Maksimum Yük Anında Numunenin Görünümü	34
Resim 3.8. Numunelerin Kurutma Fazında Etüvden Çıkarıldıktan Sonraki Görünümleri	35

SEMBOLLER

ω : Su içeriği

ω_{opt} : Optimum su içeriği

ω_L : Likit limit

ω_p : Plastik limit

I_p : Plastisite indisi

C_c : Derecelenme katsayısı

C_u : Üniformaluk katsayısı

G_s : Dane özgül ağırlığı

γ : Birim hacim ağırlık

γ_s : Dane birim hacim ağırlığı

$\gamma_{k \text{ max}}$: Maksimum kuru birim hacim ağırlık

1. GİRİŞ

Yaşadığımız 20.yüzyıl boyunca yeryüzündeki insan nüfusunun hızla artması, ulusların ekonomik kalkınmada belirli bir mesafe almaları ve teknolojik gelişmeler sonucunda sanayi ve endüstri kuruluşları da hızla gelişmiştir.

Bu gelişmeler sonucu, bir taraftan hızlı bir üretim girdisi sağlanması, yan ürün olarak çıkan atık maddelerin kontrol altına alınması ve ekonomik değerlerinin olup olmadığının araştırılması ihtiyaçları ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, ulaşım ihtiyaçlarının da hızla artması, mevcut ulaştırma sistemlerinin bakım ve onarım ihtiyaçlarını ve yeni ulaştırma yapılarına olan ihtiyacı arttırmıştır. Dolayısıyla ulaştırma yapılarında altyapı ve üstyapı malzemesi olarak büyük miktarlarda kullanılan doğal agrega, bitüm, çimento gibi malzemelerin tüketimini de hızla artırmaktadır. Bu malzemelerin kısıtlı olması, maliyetlerinin yükselmesi ve istenen özelliklerde olmaması sebepleriyle atık malzemelerin ulaştırma yapılarında değerlendirilmesi konusunda çalışmalar yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Ayrıca atık malzemelerin belli bir miktarı aştıktan sonra depolanması da büyük sorun oluşturmaktadır. Bu durum özellikle çevreci kuruluşları çözüm aramaya zorlamıştır.

Değişik üretim sektörlerinden yan ürün olarak alınan atık maddelerin atılmak yerine bazı sektörlerde “özellikle inşaat sektöründe” yardımcı malzeme olarak veya bazı esas malzemelerin yerine kullanılarak değerlendirildiği sıkça görülmektedir.

Ulaştırma yapılarında kullanılabilen atık malzemelerden biri olan cüruf, demir-çelik fabrikalarında yüksek fırınlarda üretilen demirin yanında yan ürün olarak elde edilmektedir. Cüruf, diğer bazı endüstri atıkları gibi yeniden değerlendirilebilme özelliğine sahip bir malzemedir. İnşaat sektöründe değişik işlerde sıkça kullanılan yüksek fırın cürufunun birçok ülkede ve ülkemizde karayolu üstyapısı malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda çalışmalar yapılmış ve sonuçta; yüksek fırın cürufunun, karayolu üstyapısında ve altyapı stabilizasyonunda ekonomik değeri olan bir malzeme olarak kullanılabileceği görülmüştür (İlcalı, 1988).

Yapılan çalışmanın konusu, zemin stabilizasyonunda kullanılan çimentonun belli bir kısmı yerine, yukarıda bahsedilen atık maddelerden, Sivas Demir-Çelik Fabrikası cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere, fabrikadan temin edilen değişik boyutlardaki cüruf, kırılıp, öğütülerek 80 no'lu elekten (0,177 mm) elenip hazırlanan numunelere belirli oranlarda karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin ve cüruf malzemeleri üzerinde, laboratuvar deneyleri yapılarak bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Cürufun kimyasal analizi Elazığ Ferrokrom fabrikası laboratuvarında yaptırılmıştır. Deneyler, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümü laboratuvarında ve Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu laboratuvarında yapılmıştır. Sonuçta, deneysel çalışmalarda elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve sayısal örnekleme ile ekonomik analiz yapılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

Stabilizasyon, zeminin mukavemetinin artırılması, zeminin sahip ve iklim şartlarının zararlı etkileri altında uzun süre koruyacak hale olduğu tabii mukavemetini değişik hava şartlarında koruması ve değişen yük getirilmesi için yapılan bütün işlemleri kapsar. Bu işlemler sonucu zeminlerin deformasyonlar yapmadan uygulanan yükleri taşımaları mukavemet ve stabilitelerini korumaları istenir.

Bu amaçla zemine değişik katkı maddeleri katılarak sıkıştırılması sonucu zemin kararlı bir hale getirilerek zemin stabilizasyonu yapılmış olur. Taşıma gücü bakımından en iyi malzeme, kayma mukavemetini kısmen sürtünmeden ve kısmen de kohezyondan alan malzemedir. Bir altyapı malzemesinde bu özelliklerden birisi yetersiz ise katılan başka bir malzeme ile bu eksiklik giderilir. Örneğin kil gibi ince daneli zeminlerin kohezyonu, içine kum-çakıl karıştırılarak artırılabilir. Kaba daneli zeminlerin kohezyonu ise ; kil, çimento, bitüm, kireç ve reçine gibi bağlayıcı özelliği olan malzemeler katılarak artırılabilir. Stabilizasyon işlemi için şu hususlar söylenebilir:

- Agregata ve bağlayıcı madde ilavesi ile zeminin taşıma gücünün artırılması,
- Zeminin su tutma kabiliyetini azaltarak geçirimsiz hale getirilmesi ile stabilitesinin korunması .

Zemin stabilizasyonu, yol inşaatında, altyapının sağlamlaştırılması olarak üstyapıda ise sağlamlaştırılan tabakanın alttemel tabakası olarak kullanılmasını sağlar.

Yol inşaatında genellikle kullanılan stabilizasyon metotları :

- Mekanik Stabilizasyon
- Zemin – Çimento Stabilizasyonu
- Zemin – Kireç Stabilizasyonu
- Zemin – Bitüm Stabilizasyonu
- Zemin – Reçine Stabilizasyonu

Kara ulaşım sisteminin temel elemanı olan yol inşaatında, yolun sağlam olması, uzun süre ağır trafik etkilerine dayanabilmesi ve ekonomik olması

esas amaç olduğundan , güzergah boyunca yapıma elverişsiz zeminlerin uygun stabilizasyon metodu ile özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir (Atanur,1966).

Mekanik stabilizasyon, uygun granülometriye sahip olmayan zemine belirli oranda uygun granülometrilili zemin ilave edilerek ve zemine su katılarak mekanik araçlarla sıkıştırılması sonucu zeminin taşıma gücünün artırılması şeklinde yapılır.

Artan ağır trafik şartları nedeniyle mekanik stabilizasyon ile yapılan yollar, bu trafiği belli bir süreden sonra taşıyamamakta, bakıma ve takviye tabakasına ihtiyaç göstermektedir. Yol için uygun olmayan zeminlerin ıslahı için çeşitli malzemelerle kimyasal stabilizasyonlar yapılmakta ve mekanik stabilizasyon ile elde edilene göre daha dayanıklı zemin elde edilebilmektedir (Alataş,1989).

Yol inşaatında çok kullanılan tabii stabilize malzeme ocaklarının zamanla tükenmesi, istenen özelliklerde olmaması ve yol güzergahına uzak olması veya daha dayanıklı bir stabilizasyon sağlanması amacıyla uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık malzemelerle yapılan kimyasal stabilizasyon uygulamaları giderek mekanik stabilizasyonun yerini almaktadır (Alataş,1989).

2.1. Zemin – Çimento Stabilizasyonu

Zemin – çimento stabilizasyonu, ufalanması ve pülverizasyonu mümkün olan zeminlerin belirli oranlarda çimento ilavesi ile sertleşme başlamadan önce optimum su muhtevasında maksimum yoğunluk elde edebilecek şekilde sıkıştırılmasıdır (Alataş, 1989). Zemine mukavemet kazandırmak amacı ile çimento karıştırıldığında, zeminin kayma mukavemeti artar ve zeminin geçirgenliği azalır. Çimento ile stabilizasyon, sadece tabii zeminler için değil, aynı zamanda kullanılmış veya atık malzemelere mukavemet kazandırılmasında da kullanılır(Kumbasar , Kip , 1984).

Zemin çimento stabilizasyonu ilk defa 1917 yılında İngiltere’de H.E.Brooke – Bradley isimli bir mühendis tarafından uygulanmıştır. Daha

sonra İkinci Dünya Savaşı sırasında yol ve havaalanı inşaatlarının maliyetlerini düşürülmesi amacıyla geniş çapta uygulanmıştır. Savaştan sonrada birçok hafif trafikli yol, yerinde karıştırma metodu ile zemin çimento stabilizasyonu uygulanarak inşa edilmiştir.

Zemin – çimento stabilizasyonu, bugün dünyanın birçok yerinde ekonomik inşaat sistemi olarak kullanılmaktadır. Zemin – çimento karışımları, yalnız yol inşaatlarında değil, aynı zamanda bina inşaatlarında temel ve tuğla işlerinde de belirli bir oranda kullanılmıştır (Cilason, 1964).

Zemin – çimento stabilizasyonu, yol inşaatında daha çok siltli ve killi zeminlere uygulanır. Genellikle stabilizasyonun kalınlığı 0,15 m. kadar yapılır. Bunun sebebi karışım makinalarının daha derin tabakaları etkileyememesidir. Daha kalın stabilizasyon ihtiyacı olduğunda birden fazla tabaka halinde yapılması uygun olur.

Zemin – çimento stabilizasyonunda uygun sonuçlar veren zemin granülometrisi Tablo 2.1'deki sınırlar arasında olmalıdır (Yıldırım, 1984).

Tablo 2.1. Amerikan Standart Eleklerine Göre , Zemin – Çimento Stabilizasyonuna Uygun Zemin Granülometrisi Sınır Değerleri.

Elek No	(%) Geçen
4 (4,76 mm)	80-100
10 (2,00 mm)	50-100
40 (0,42 mm)	20-95
80 (0,177 mm)	10-65
200 (0,074 mm)	5-15

Karışımın granülometri bakımından maksimum dane çapı 2" i geçmemelidir. Atterberg Limitleri bakımından da; likit limit % 40 'tan , plastisite indisi % 18 ' den büyük olmamalıdır. Zemindeki organik madde miktarı az olmalı, çünkü; organik maddeler zemin – çimento karışımının mukavemetini düşürücü etki yapar. Organik madde miktarı % 2 ' den fazla olmamalıdır. Çimentonun prizine etki edecek sülfatlı tuzların bulunmaması gerekir.

Stabilizasyonda 7 gün sonunda minimum basınç mukavemetinin $17,5 \text{ kg/cm}^2$ olması istenmektedir. Zemin – çimento stabilizasyonunun yol inşaatında uygulanmasında; yol bir iş gününde stabilizasyon yapılabilecek uzunluklara ayrılır. Temel zemini belirli bir derinliğe kadar tırmıkla kabartılıp gevşetilir. Bu malzeme havalandırılır ve kuru karıştırılır. Sonra yola serilerek üzerine belirlenen oranda çimento ilave edilir. Zemin ve çimento tırmık ve Harrow diski ile kuru olarak karıştırılır. Sonra tespit edilen miktarda su püskürtülür. Malzeme karıştırılır ve ıslak karışım keçi ayağı ile sıkıştırılır. Greyder ile yüzey tesviyesi yapılır. Yol, bir hafta bekletildikten sonra trafiğe açılır. Çimento stabilizasyonun üzerine bir süre sonra yüzeysel kaplama yapılırsa aşınmada önlenmiş olur (Yıldırım , 1984).

Çimento, zemin içindeki mineral parçaları arasında kuvvetli bir bağlantı oluşturur. Zemin parçaları tespit edilir ve birbiri üzerinde kaymaları önlenir. Böylece zeminin plastisitesi değişir ve kesmeye karşı direnci artar (Umar, Ağar, 1985).

Çimento, killi zeminlerin su tutma kapasitesini azaltıcı rol oynadığından, çimento ile stabilize edilmiş zeminler, absorbe edilmiş suyun hacim artırıcı ve yumuşatıcı etkilerine karşı korunmuş olurlar. Çimento, donma ve çözülme olaylarının bozucu etkilerinden de zemini korur. Çimento ile stabilizasyonun başarısında; zeminin cinsi, çimento miktarı, sıkıştırma sırasındaki su oranı ve sıkıştırma sonunda elde edilen yoğunluk etkilidir. Bu değerler, incelikli bir biçimde belirtilmeli ve yapım sırasında kontrol edilmelidir.

İyi granülometrilili zeminler aynı zamanda dona karşı daha az hassas ve şişmeye karşı daha az elverişli olduklarından bu gibi malzemelerin stabilizasyonu daha az çimento ile yapılabilir. Buna karşılık üniform daneli kumlar ve dona karşı hassas siltler için stabilizasyonda daha fazla çimento gerekir (Umar, Ağar, 1985).

Bir proje için yapılacak ön çalışmalara gerekli olan laboratuvar deneyleri; inşaat şartları, değişik zemin cinsleri, işin büyüklüğü ve istenen

hassasiyet derecesi ve bunlara benzer faktörlere bağlıdır. En uygun sonucu veren minimum çimento miktarı her zemin için ayrı ayrı tespit edilmelidir.

Stabilizasyon yapılacak zemini maksimum yoğunluklar yakınlarında azar azar artan miktarlarda çimento ile karıştırıp, bu karışımları deneyerek en uygun zemin – çimento oranını bulmaktır. Stabilizasyonda su – çimento oranı betondaki kadar değildir. Zemin içindeki su miktarı, optimum su muhtevsından %1- %2 fazla ve hidratasyona kafi gelecek kadar olmalıdır. Rutubetin zeminin her tarafına homojen olarak dağılmış olması gerekir. Su içinde yabancı madde bulunmamalıdır. Stabilizasyonda karışımın iyice sıkıştırılmış olması gerekir. Laboratuvarıda elde edilen mukavemet arazidekinden daha yüksek olur. Arazide elde edilecek mukavemet % 40- 60 azalabilir (Yıldırım, 1998).

Çimento tabii zeminle karıştırıldığında, karışımın kuru yoğunluğu düşer. Belirli bir su muhtevsında, zemin – çimento karışımı küre tabi tutulduğunda, beton gibi sertleşir. Sertleşmenin devam etmesi için, zemin – çimento karışımının küre devam ettirilmesi gerekir. Yapılan çalışmalara göre; siltli – kil cinsinden bir zeminde kür süresinin serbest basınç mukavemetini arttırdığı görülmüştür (Cilason, 1964).

Genel olarak, zemin – çimento karışımları 7-8 günlük bir kürden sonra sertleşir. Bu sertleşme süresi çimento miktarına da bağlıdır. Kür süresince, zemin – çimento karışımı rutubetli bir ortamda tutulmalı ve su kaybı en aza indirilmelidir. Hidratasyon ise betondaki gibi olur.

Zemin – çimento stabilizasyonu ile elde edilen tabaka bir aşınma tabakası olarak kullanılmamalıdır. Çünkü, ağır trafik yükleri altında tabaka yüzeyi sökülmelele maruz kalır ve toz yapmaya başlar. Yol yüzeyi koruyucu bir tabaka ile örtülebilir. Trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı ince bir bitümlü yüzey kaplaması gereklidir. Bu bitümlü tabaka hem kür için bir koruyucu tabaka hem de üzerine gelecek olan aşınma tabakasına astar görevi yapacaktır.

Zemin – çimento stabilizasyonu plastik zeminler ile de yapılmaktadır. Bununla beraber, en iyi sonucu granüler zeminler vermektedir. Çimentonun zemin ile üniform bir şekilde karışması gerekir. Bu sebeple, çalışılan zemin

plastik zemin ise, ve belli bir miktar rutubet ihtiva ediyorsa, zeminin iyice kurutulması ve pülverize edilmesi gerekir.

2.2. Yüksek Fırın Cürufu

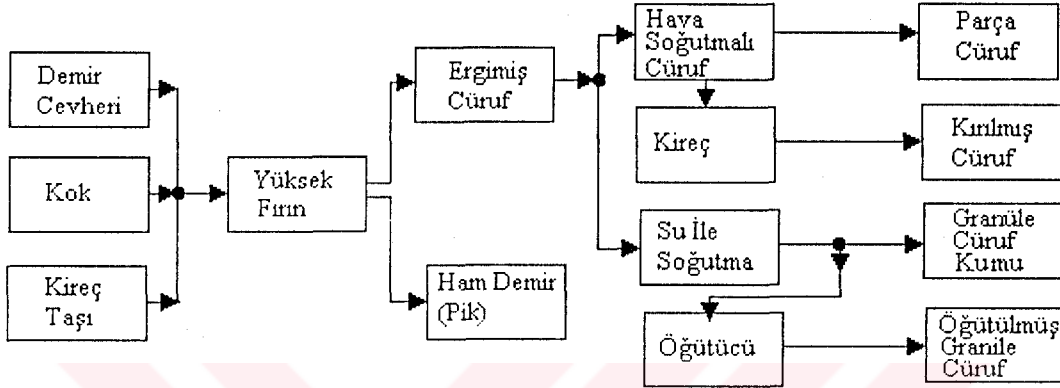
Birçok tanıma göre cüruf, demir-çelik fabrikalarındaki yüksek fırınlardan elde edilen atık bir üründür. Ülkemizde de yaygın olan bu tanım artık geçerliliğini yitirmektedir. Yapılan çalışmalar yüksek fırın cürufunun ekonomik değerinin gün geçtikçe arttığını göstermektedir. Öyle ki, yüksek fırın cürufu atık bir madde olmaktan çıkmış ekonomik değeri olan bir ara ürün haline gelmiştir. Endüstride elde edilen atık ürünlerin değerlendirilmesi son yıllarda üzerinde oldukça durulan bir konu olmuştur. Büyük bir kısmı kullanılmayan yüksek fırın cürufunun değerlendirilmesi ülkemiz ekonomisine önemli katkılar sağlayabilecektir.

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda sıcak maden üretimi sırasında cevherin demir dışındaki bileşenleri ile eritme işlemi için ortama eklenen maddelerin madenden ayrılarak oluşturdukları maddedir (Ilıcalı,1988).

Demir cevherleri, doğada esas olarak içerdikleri demir oksit bileşenlerinin yanı sıra silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi bazı yabancı maddelerle bir arada bulunmaktadır.

Cevher içindeki demiroksitten demir elde edebilmek için, yüksek fırınlarda kok kömürü (karbon) ve arıtma işleminde yardımcı madde (flux) olarak kullanılan kalker taşı ile birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutulurlar; redükleme sonucunda, demiroksitteki oksijen kok kömürünün karbonuyla birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit olarak cevheri terk ederken geride, eriyik durumunda, demir oksit ile birlikte kireç kok kömürü külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Eriyiğin üst kısmında yer alan cüruf buradan yan ürün olarak dışarı çıkartılarak geride sadece demirin kalması sağlanmaktadır (Erdoğan, 1993).

Cüruf, demir cevheri, demiroksit, silisyum ve alüminyum oksitlerin bir karışımıdır. Fırın içinde oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda demir, demir okside indirgenir, silisyum ve alüminyum oksitler kireç taşı ve dolomitin kalsiyumu ile birleşerek cürufu meydana getirirler. Kimyasal reaksiyonlar, fırındaki demir cevheri, kireç taşı ve dolomitte birlikte kokun yanmasıyla yüksek bir sıcaklıkta meydana gelir (İlcalı, 1988).



Şekil 2-1 Demir-Çelik fabrikalarında cürufa ait akış diyagramı

Yüksek fırında eriyik halde çıkan atık malzemeler soğutulma hızına ve yöntemine bağlı olarak, değişik karakteristikler gösterirler.

Yüksek fırın cürufu genellikle aşağıdaki şekillerde elde edilmektedir (İlcalı, 1988).

1. Havada Soğutulmuş Cüruf

Yüksek fırından çıkan kor halindeki cüruf, raylar üzerinde hareket eden potalarla taşındığı çukurlarda kendi halinde soğumaya bırakılırlar. Böylece büyük kütleler halinde sertleşen cürufa “Hava soğutmalı cüruf” denilir. Cüruftan daha uygun parçalar (küçük boyutlarda) elde etmek için üzerine su serpilmesi gerekir. Kırma ve eleme işi için ise konkasör tesisleri kullanılır.

2. Köpüklendirilmiş Cüruf

Ergimiş cürufu özel bir çukura boşaltırken üzerine kontrollü şartlar altında su püskürtülürse, ani buhar doğuşu sonucunda genleşmiş bir cüruf elde edilir.

Köpüklü cüruf adı verilen bu cürufun birim hacim ağırlığı yaklaşık 0.8 ton/m³ olduğundan hafif agrega olarak kabul edilmektedir.

3. Granüle Cüruf

Ergimiş cürufa yüksek basınçlı su püskürtülerek elde edilir. (Su/cüruf oranı 10/1). Hızlı soğumadan dolayı kristalleşmeye vakit bulamadan camsı bir malzeme halinde katılaştıran bu cürufa “granüle yüksek fırın cürufu” denir. Önceleri granüle cüruf, merkez granülasyon ünitelerine potalarla taşınan ergimiş cürufun, su içine devrilmesi veya basınçlı su püskürtülerek elde edilmekteydi. Ancak bu durumda cürufun potalarla taşınması sırasında ısısının düşmesi, kristalizasyonu başlatarak granülasyon esnasında camlaşmış kısmın azalmasına neden olmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte cüruf, yüksek fırınların yanında basınçlı su püskürtme sistemiyle %100 granüle edilebilmektedir. Bunun için filtrasyon havuzları, eleklerle süzme sistemleri gibi granülasyon sistemleri geliştirilmiştir.

Granüle cüruf, kum taneleri şeklinde cam gibi parlayan, rutubeti %8-15, yoğunluğu 1.1, dane çapı 0-5 mm arasında olan rengi gri-beyaz arasında değişen puzzolan bir maddedir. Granüle cürufun puzzolanik özelliği (yüksek hidrolik özelliği), sahip olduğu özelliklere bağlı olarak değişebilmektedir.

4. Pelletize Cüruf

Yüksek fırından alınan cürufun granüle cüruf üretimi için gerekenden daha az su kullanılarak soğutulması ve parçalanmasına "pelletizasyon" denilmektedir. Pelletizasyon sonucunda dane boyutları 0-30 mm arasında değişen (%75'i 0-4mm, 0.25'i 4-30 mm), yoğunluğu 0.6 -1.1 ton/m³, rutubeti % 2-8 ve camlaşma kısmı %80 olan pelletize cüruf elde edilmektedir (İlcalı, 1988).

2.2.1. Cürufun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Cürufun kimyasal yapısı, kısmen demir cevherinin özelliklerini yansıtır. Yüksek fırında çıktığında yaklaşık 1400-1600 °C da eriyik haldeki cüruf, havada yavaş soğutulmaya bırakıldığında gri, kristal yapıya taş gibi bir malzeme haline dönüşmektedir.

Yüksek fırın cürufları kireç, silis, alümin, demir, magnezi, manganoksit, kükürt gibi maddelerden oluşmaktadır. Bu maddelerin cüruf içindeki yüzdeleri kullanılan ham maddenin özelliğine göre değişiklik gösterir. Çizelge 2.1'de değişik ülkelerde elde edilen yüksek fırın cüruflarının yaklaşık kimyasal kompozisyonları verilmiştir.

Tablo 2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu (%)

	ABD Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu*
Ca O	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
Si O ₂	30-40	30-60	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6
Mg O	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4
S	0-2	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
S O ₃	-	-	-	-	1-3

*Portland çimentosunun tipik kimyasal kompozisyonu karşılaştırma amacı ile verilmiştir.

Silisli ve alüminli yapıya sahip olan yüksek fırın cürufu, granüle cüruf olarak amorf yapıya sahip olarak üretildiğinden, öğütüldüklerinde doğal puzolanlar veya uçucu küller gibi puzolonik özellik göstermektedirler. Yani kalsiyum hidroksit ve su ile bir araya getirildiklerinde hidrasyon sonucu bağlayıcı özellik göstermektedirler. Aslında öğütülmüş durumdaki granüle yüksek fırın cürufları, içerdikleri kireçten dolayı, kendi başlarına bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptirler (Erdoğan, 1993).

Havada soğutulan cüruf kırılıp elendiği zaman fiziksel özellikleri bazı özel avantajlar göstermektedir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, iyi bir sürtünme özelliğine sahip olması ve pürüzlü bir yüzeyi olması nedeniyle iyi bir adezyona sahip olması üstün özelliklerindendir. Diğer taraftan cürufun su absorpsiyonu çok yüksektir. Buna karşılık dona karşı gösterdiği dayanımı da oldukça büyüktür. Kendi halinde soğumaya bırakılan cürufun granülometrisi çok düzensizdir. Ancak kırma ve eleme işlemine tabi tutulduğunda istenen granülometriye getirilebilir (Ilıcalı,1988).

Sivas Demir – Çelik Fabrikasından temin edilen hava soğutmalı cürufun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

- Birim hacim ağırlık deneyi (TS 3529)
- Özgül ağırlık deneyi (TS 3526)
- Los Angeles aşınma deneyi (TS 3694)
- Dona dayanıklılığın kimyasal yöntemle tayini (Na_2SO_4)(TS 3655)
- Su emme oranı tayini (TS 3526)

Yapılan deneylerin sonuçları Bölüm 3'te verilmiştir.

2.2.2. Cürufun Kullanım Alanları

Cüruf, inşaat sektöründe, demiryolu balastı, beton agregası, çimento sanayi, biriket ve tuğla yapımı, cüruf yünü, prefabrik eleman ve blok yapımı, atıl dolgu malzemesi, yol temel ve alt temel malzemesi ve stabilizasyon malzemesi olarak, geniş bir alanda kullanılabilir. Bu kullanım alanlarından bazıları hakkında bilgiler aşağıda özetlenmiştir (Ilıcalı, 1988 - Erdoğan, 1993).

1-Katkılı Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı

Öğütülmüş durumda, puzzolanik özellik gösteren granüle yüksek fırın cüruflarının, bağlayıcılık özelliğinden faydalanılarak katkı çimento ve katkı beton elde edilebilmektedir.

Portland çimentosu üretiminde kullanılan klinkerin azaltılarak, yerine yaklaşık olarak ağırlıkça %30 oranında granüle yüksek fırın cürufu konulduğunda,

cüruf çimentosu veya demirli portland çimentosu elde edilir (TS 20). Ancak her cüruf çimento üretiminde kullanılmaz. Bunun için cürufun kimyasal ve fiziksel açıdan bazı şartları sağlaması gerekir.

Ağırlıkça %15-69 portland çimentosu ile %31-69 limitleri arasında cüruf karıştırılarak ta yüksek fırın çimentosu elde edilir. En çok üretilen cüruf çimento cinsi budur.

%70'den fazla cüruf ve %30'dan az yağlı kirecin karıştırılmasıyla da kireç esaslı cüruf çimentoları elde edilir. Bu çimentonun kimyasal etkilere karşı direnci oldukça yüksektir.

Beton üretiminde bağlayıcılık görevi olan portland çimentosu bir miktar azaltılarak, yerine çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katılmasıyla cüruf katkılı beton elde edilmektedir. Bu betonlar sülfatlı ortamlara karşı oldukça yüksek dayanıklılık gösterebilmektedir.

Cüruf katkılı çimentoların içerisinde veya öğütülmüş durumda katıldıkları betonun içerisinde yer alan yüksek fırın cürufları, portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda kalsiyum hidroksitle birleşerek bağlayıcılık değeri kazanmaktadırlar.

2-Agrega Olarak Kullanımı

Havada soğutulan yüksek fırın cürufları oldukça sert yapıya sahip olduklarından, kırılarak agregaya haline getirilmekte ve beton yapımında agregaya olarak kullanılabilir. Ancak cürufun yapısında bulunabilecek bir miktar kükürt betonun hacim sabitliğini etkileyebilmekte ve dayanıklılık sorununu yaratabilmektedir. Bu durumda elde edilen agreganın beton yapımına uygunluğu deneylerle tespit edilmelidir.

Genişletilmiş veya köpürtülmüş olarak soğutulan cüruflar gözenekli olduklarından kırılarak hafif agregaya elde edilmekte ve hafif beton yapımında

kullanımı mümkün olabilmektedir. Elde edilen hafif agrega dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

Yüksek fırın cürufun beton üretiminde agrega olarak kullanılmasından iyi sonuç alınmıştır. İyi ayarlanmış bir granülometri ile elde edilen beton numuneleri üzerinde uygulanan kesme ve basınç dayanımı deneylerinden çok iyi sonuçlar alınmış hatta çakıl ve kireç taşı ile yapılan betona göre daha yüksek dayanım değeri tespit edilmiştir (İlcalı, 1988).

3-Cüruf Yünü Üretiminde Kullanımı

Cürufun tekrar ergitilerek ve bazı maddeler katılarak buhar veya basınçlı hava üflenmesi ile cüruf yünü elde edilir. Cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı cüruf yünleri üretilebilmektedir. Cüruf yününün korrozif etkileri yoktur, aşırı ses izolasyon kabiliyeti ve ateşe dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Cüruf yünü ısı ve ses izolasyonunda başarı ile kullanılabilir.

4-Cürufun Zırai Amaçla Kullanımı

Cüruf, toprağın asitlik oranını indirmek, toprağın fiziksel karakteristiklerini düzeltmek ve temel bitki besleyicilerinin kaybını önlemek için zırai amaçla da kullanılabilir. Cüruf, bitki büyümesi için gerekli olan manganez, sülfür ve demir gibi elementleri bolca içermektedir. Bileşiminde bulunan CaO ve MgO ile toprağın asidini nötralize etmektedir.

5-Diğer Kullanım Alanları

Cüruf, dayanıklı oluşu, ses yutuculuk ve temizlik avantajları olduğundan demiryolu balastı olarak kullanılabilir. Ayrıca hava etkilerine karşı dayanıklı oluşu, esnekliği ve iyi bir bağlantı yüzeyine sahip olmasından dolayı doğal taşlara tercih edilmektedir. Metal aksamlara karşı korrozif olmadığı da tespit edilmiştir. Balast olarak havada soğutulmuş cüruf kullanılmaktadır.

Cüruf, hidrolik prizinin yavaş olması, drenaj kabiliyeti ve çevre etkilerine dayanıklılığı gibi sahip olduğu özellikler sebepleriyle uygun bir yol agregasıdır. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu, çelik cürufu ve granüle cüruf yol üst yapısının tüm tabakalarında kullanılabilir. Ayrıca granüle cüruf bir akivatör ile birlikte taşıma gücü düşük taban zeminlerinin stabilizasyonunda da kullanılabilir.

Cüruf yapılarda çatı kaplama malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Bu tip çatı kaplamaları rüzgara, yağmura, dona ve yangına karşı dayanıklıdır.

2.2.3. Ülkemizde Cüruf Üretimi ve Değerlendirilmesi

Ülkemizde cüruf, Karabük, İskenderun, Ereğli ve Sivas Demir-Çelik fabrikalarında yan ürün olarak büyük miktarlarda elde edilmektedir. Elde edilen bu cürufun çok az bir kısmı granüle cüruf yapılarak çimento sanayinde değerlendirilmiştir. Bu sebeple Demir-Çelik fabrikalarında büyük bir atık depolama sahası ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde Yüksek fırın cürufu üreten fabrikalar ve üretim yöntemleri aşağıda gösterilmiştir.

1-Karabük, İskenderun ve Ereğli Demir-Çelik Fabrikaları Cürufları

Karabük, İskenderun ve Ereğli Demir-Çelik fabrikalarında yan ürün olarak alınan cürufun ancak bir kısmı granüle cüruf haline getirilerek çimento fabrikalarına satılmak suretiyle değerlendirilebilmektedir.

Erdemir cürufunun değerlendirilmesi ile ilgili olarak ilk defa 1968 yılında Kruup (Almanya) ve Industrial Export (Romanya) firmaları uzmanları tarafından, araştırma yapılmış ve sonuçta Erdemir cürufunun çimento sanayinde kullanılmaya elverişli olduğuna karar verilmiştir. Daha sonra 1979 yılında Desiyab tarafından “ Yüksek Fırımlar Cüruf Granülasyon Tesisleri ile Cüruf Çimento Öğütme ve Paketleme Tesisi Yapılabilirlik Etüdü “ yapılmıştır. Etüt sonunda, Erdemir cürufunun yüksek fırın yanında kurulacak havuzlu sistemle değerlendirilmesi önerilmiş ve öncelikle Bolu, Hereke ve daha sonra Bartın, Ünye ve Çanakkale çimento fabrikalarında çimento klinkerine katkı malzemesi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Daha

sonraları Erdemir olanakları ile basit bir ekipmanla deneme mahiyetinde granüle cüruf üretimine geçilerek pazar olanakları araştırılmıştır. Ancak çevre kirliliğine neden olduğundan üretim durdurulmuştur (İlıcılı, 1988).

2-Sivas Demir-Çelik Fabrikası Cürufu

Sivas Demir-Çelik fabrikası 1992 yılında üretime başlamıştır. Yıllık ortalama çelik üretimi; 450.000 ton sıvı çelik, 400.000 ton mamül maddedir. Yuvarlak inşaat demiri olarak , Ø5,5-32 mm arasında üretim yapılabilmektedir. Yuvarlak demir Ø16 mm.ye kadar kangal yapılabilmekte ayrıca Ø12-32 mm.lik demirler uzun mamül olarak üretilmektedir.

Elde edilen sıvı çeliğe önce fosfor giderme (P_2O_5 Pentaoksit) ve alüminyum ile oksijen giderme işlemleri yapılmaktadır. Sıvı çelik daha sonraki bölümde, kükürttten arındırılma işlemi yapılmakta ve çeliğin kimyasal analizi ayarlanmaktadır.

Elde edilen sıvı çelik beş yol halinde, 120x120 mm. kesitli, 12 m. boyunda kütükler halinde dökülmektedir. Bir sonraki adımda haddehaneye gönderilen kütükler burada 900°C 'de yeniden eritilerek mamül madde haline getirilmekte ve üretilen mamül maddeler 1100°C 'de tavlannmaktadır. Sivas Demir-Çelik fabrikasında yan ürün olarak alınan cüruf herhangi bir işleme tabi tutulmadan potalar vasıtasıyla atık deposuna atılmaktadır. Atık deposuna atılan cüruf, açık havada, yavaş soğuma sonunda, genellikle iri parçalar halinde olmak üzere, irili ufaklı yapıda katılaşmaktadır. Cüruf kendi halinde soğumaya bırakıldığından granülometrisi çok düzensizdir. Ancak kırma ve eleme işlemine tabi tutularak istenen granülometriye getirilebilir.

Fabrikanın atık sahasında yaklaşık olarak 30.000 ton cüruf atığı bulunmaktadır. Fabrikanın yıllık üretim miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte ortalama 8.000-10.000 ton civarında cüruf yan ürün olarak elde edilmektedir. Sivas Demir- Çelik fabrikası cürufunun kimyasal analizi Tablo 3.1'de verilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyler, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında ve Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu İnşaat Programı Laboratuvarında yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan zemin malzemesi üzerinde ;

- Elek analizi,
- Likit limit,
- Plastik limit,
- Zemin danelerinin özgül ağırlığının ölçümü,
- Standart procktor deneyi (Maksimum kuru birim hacim ağırlık-Optimum su muhtevası),
- Organik madde tayini,
- Kil oranı,

deneyleri yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan cüruf malzemesi üzerinde ;

- Kimyasal analiz (Ferrokrom işletmesi laboratuvarında yapıldı),
- Özgül ağırlık,
- Birim hacim ağırlık,
- Los Angeles aşınma,
- Dona dayanıklılık,
- Su emme oranı tayini,

deneyleri yapılmıştır.

Hazırlanan değişik oranlardaki, zemin-çimento ve zemin-çimento-cüruf numuneleri üzerinde aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

- Standart procktor deneyi,
- Serbest basınç mukavemeti,
- Islatma-kurutma deneyi,
- Donma-çözülme deneyi,

3.1. Stabilizasyonda Kullanılan Malzemeler

Deneylerde zemin olarak, Fırat Üniversitesi Rektörlük Kampüsünde bir bina temel kazısından alınan zemin kullanıldı. Çimento ise Elazığ Çimento Fabrikasının ürettiği PKÇ/B – 32,5 R Portland Çimentosu kullanıldı. Bu Portland çimentosunun özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Cüruf, Sivas Demir Çelik Fabrikasından getirildi, öğütülerek 80 nolu (0,177 mm) elekten geçen kısmı stabilizasyon ile ilgili deneylerde kullanıldı.

Tablo 3.1. Sivas Demir- Çelik Fabrikası Cürufunun Kimyasal Analizi
(Elazığ Ferrokrom İşletmesi Laboratuvarı)

Bileşenler	Ağırlıkça (%)
SiO ₂	20
FeO	22
Cr ₂ O ₃	3,50
MgO	13
Al ₂ O ₃	16,3
CaO	24,50

Tablo 3.2. Elazığ Çimento Fabrikasında Üretilen PKÇ/B-32,5 R Çimentosunun Özellikleri
(Fabrika verileri)

Bileşenler	Ağırlıkça (%)		Ağırlıkça (%)
SiO ₂	25,23	90 µ ‘luk eekte kalan	0.8
Al ₂ O ₃	7,53	45 µ ‘luk eekte kalan	12.7
Fe ₂ O ₃	5,42	Hacim genleşmesi	4
CaO	49,16	Özgül ağırlık	2.94
MgO	3,95	Yoğunluk	975 g/lt
SO ₃	2,39	Basınç Mukavameti 1 günlük	8,2 N/mm ²
SCaO	1,91	2 günlük	15,3 N/mm ²
Tayin edilemeyen	4,76	7 günlük	26,3 N/mm ²
Kızdırma kaybı	1,56	28 günlük	37,8 N/mm ²
Katkı	26,78		

Amerikan Karayolları Araştırma Merkezi (Highway Research Board) stabilizasyonda ekonomik olarak kullanılabilecek zemin özelliklerinin aşağıdaki değerlerde olması gerektiğini tespit etmiştir (Atanur, 1966).

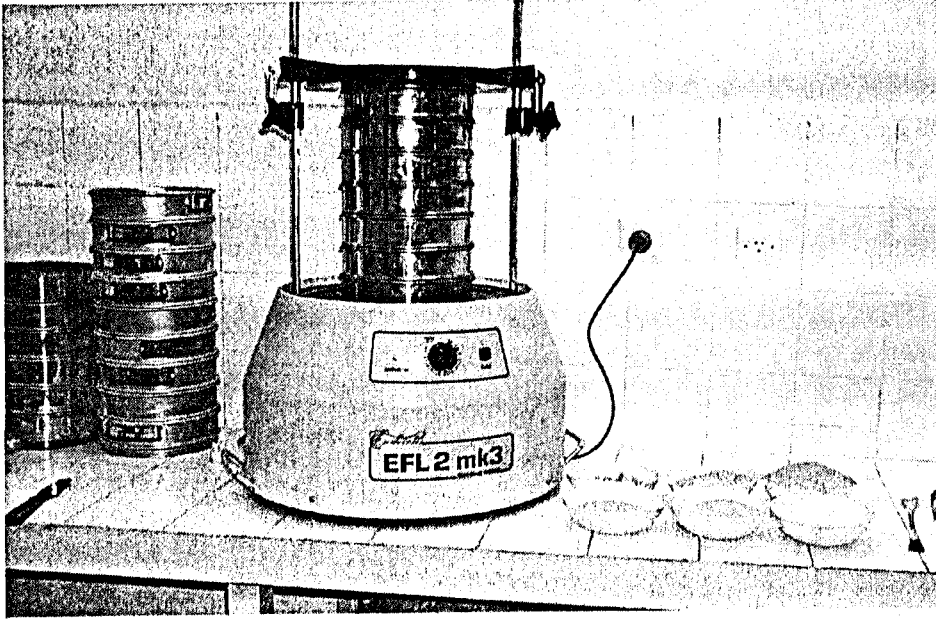
- Maksimum dane çapı : 3 inç,
- 4 nolu elekten geçen % 50' den az olmamalı,
- 40 nolu elekten geçen % 15- 100 arasında olmalı,
- 200 nolu elekten geçen % 50' den fazla olmamalı,
- Likit limiti 40 'dan fazla olmamalı,
- Plastisite indisi 18 'den fazla olmamalıdır.

3.2. Yapılan Deneyler

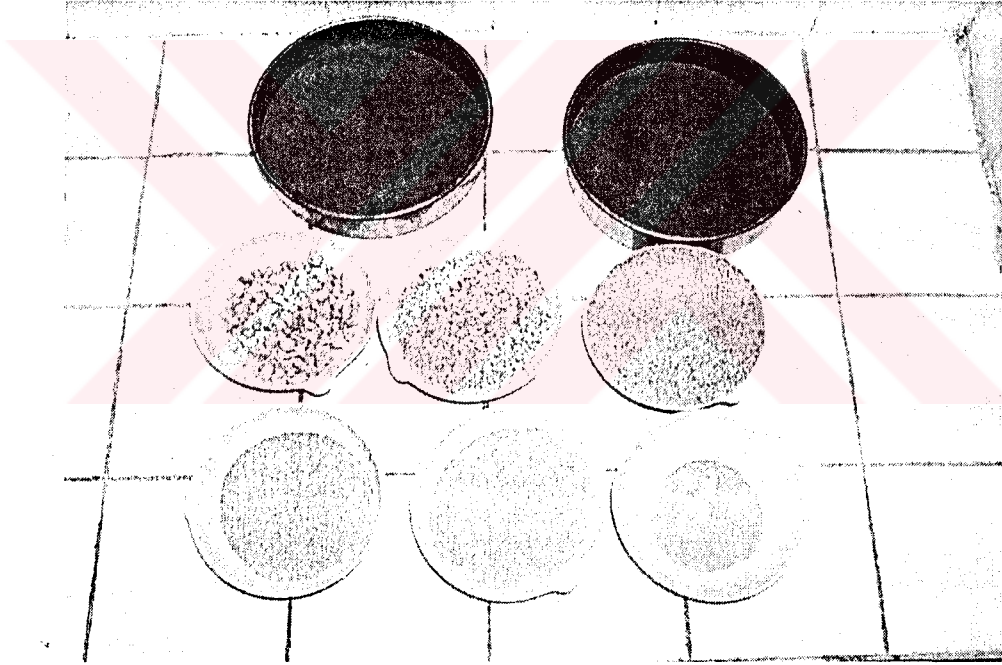
3.2.1. Elek Analizi Deneyi

Stabilizasyonda kullanılabilecek zemin özelliklerinin şartnamelerde belirtilen sınırlar dahilinde olduğunun araştırılması amacıyla elek analizi yapıldı.

Elek analizi deneyinde zemin etüvde 105°C de 24 saat kurutularak elek serisinde elendi. Elek serisi olarak; No:4(4,76mm), No:10(2mm), No:40 (0,42mm), No:80(0,177), No:200(0,074mm) elekleri kullanıldı. Her elek üzerinde kalan zemin tartılarak, her elekten geçen ve kalan miktarlar % olarak tespit edildi. Bulunan değerler ve sınır değerleri Tablo 3.3'de gösterildi ve Şekil 3.1'deki granülometri eğrisi çizildi. Resim 3.1'de elek analizi deney seti ve Resim 3.2' de zemin ve cürufun elendikten sonraki durumu gösterilmiştir.



Resim 3.1. Elek Analizi Deney Seti

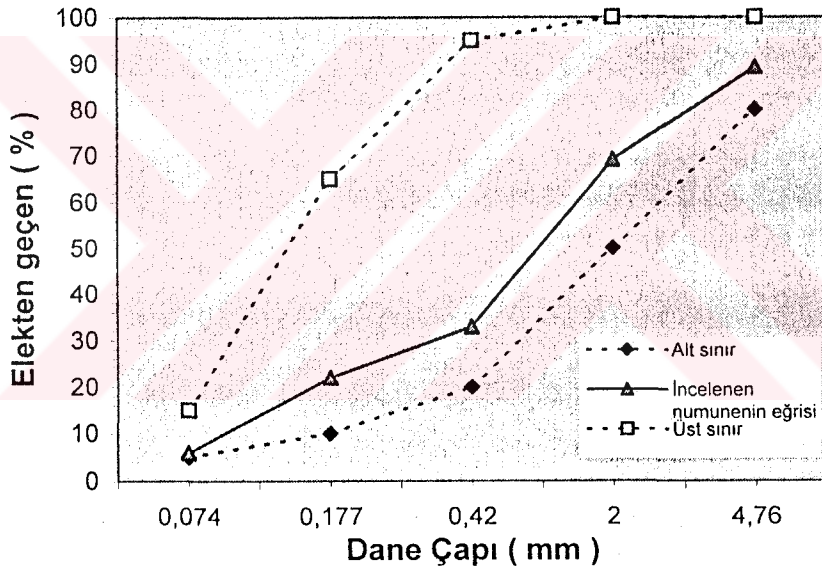


Resim 3.2. Zemin Numunesinin Dane Büyüklüğüne Göre Ayrılmış Hali ve Cürufun 80# Nolu Elekten Elenmiş Hali

Yapılan deneylerde kullanılan zeminden 1813 g. numune alınarak üzerinde elek analizi yapılmış, elde edilen sonuçlar ve sınır değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerde Kullanılan Zeminin Elek Analizi Sonuçları ve Sınır Değerleri

Elek No	Her Elekte Kalan		Toplam Kalan		Toplam Geçen (%)	Sınırlar Geçen (%)
	Ağırlık (g.)	(%)	Ağırlık (g.)	(%)		
4 (4,76 mm)	195	10,8	195	10,8	89,2	80-100
10 (2 mm)	367	20,2	562	31,0	69,0	50-100
40 (0,42 mm)	655	36,1	1217	67,1	32,9	20-95
80 (0,177 mm)	198	10,9	1415	78,0	22,0	10-65
200 (0,074 mm)	292	16,1	1707	94,1	5,8	5-15
Topl. Kabı	106	5,9	1813	100,0	-	



Şekil 3.1. Deneylerde Kullanılan Zeminin Granülometri Eğrisi

Deneylerde kullanılan zeminin granülometri eğrisi Şekil 3.1. de görüldüğü üzere, Tablo 2.1'de verilen Amerikan standart eleklerine göre, Zemin – Çimento stabilizasyonunda uygun sonuçlar veren zemin granülometrisi sınır değerleri arasında kalmaktadır.

3.2.2. Zemin ve Cüruf Danelerinin Özgül Ağırlıklarının Ölçümü ve Diğer Deneyler

Zemin danelerinin özgül ağırlıklarının ölçümü TS 1900 'e göre yapıldı. 2,5 mm 'lik elekten elenen örselenmiş zemin numunesi alınarak piknometre (bağıl yoğunluk şişesi) metodu ile deney yapıldı (TS 1900, 1987). Zeminin dane özgül ağırlığı $G_s = 2,622$ olarak bulundu.

Öğütülerek 80[#] nolu elekten elenmiş cüruf danelerinin TS 3526' ya göre yapılan deney sonucunda dane özgül ağırlığı $G_s = 2,846$ ve su emme oranı % 30,7 olarak tespit edildi.

Zemin numunesinde organik madde tayini amacıyla, TS 3673' e göre % 3 'lük sodyum hidroksit çözeltisiyle yapılan deney sonucunda sıvı kısmın renksiz yada çok açık renkte olduğu görüldü. Buna göre zeminde zararlı madde olmadığı sonucuna varıldı.

Zemindeki kil oranı, yıkama metoduyla yapılarak , % 58 olarak bulundu.

Cürufun aşınma oranının tayini için TS 3694' e göre Los Angeles aşınma deneyi yapılarak, cürufun aşınma oranı % 30,7 olarak tespit edildi.

Cürufun birim hacim ağırlığı TS 3529 'a göre yapılan deney sonucunda $1,339 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edildi.

Cürufun dona dayanıklılık tayini TS 3655 'a göre yapılan deney sonucunda %8,3 olarak tespit edildi.

3.2.3. Likit Limit ve Plastik Limit Tayini

Likit limit, zeminin plastik durumundan akıcı duruma geçtiği andaki su içeriğinin sayısal değeridir. Başka bir ifade ile likit limit aletinin (Casagrande cihazı) küre kapağına sıvayan zeminde, standart boyutta açılan bir olukta 25 düşüş sonucunda 1 cm kapanmanın olduğu andaki su içeriğinin sayısal değeridir.

Likit limit deneyi, 400 μ 'luk elekten elenen zemin numunesi üzerinde TS 1900'e göre yapılarak likit limit değeri tespit edildi. Deney sonunda tespit edilen düşüş sayıları logaritmik olarak yatay eksen, su içerikleri de düşey eksen, işaretlendi. Elde edilen noktalara en iyi uyan doğru çizildi. Çizilen bu akış doğrusu üzerinde 25 düşüşe karşılık gelen su içeriği değeri likit

limit değeri olarak alındı. Likit limit değeri $\omega_L = 32,4$ (%) olarak tespit edildi. Resim 3.3'te su içeriğinin tespiti için alınan numuneler gösterilmiştir.

Plastik limit, zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğidir. Başka bir ifade ile zeminin 3 mm. çapında silindirik çubuklar biçiminde yuvarlandığında, çubukların yüzeylerinde çatlamlar ve kopmalar olduğu andaki su içeriğinin sayısal değeridir. Plastik limit deneyi, açık havada kurutulmuş, 400 μ 'luk elekten elenen zemin numunesi üzerinde TS 1900'e göre yapılarak plastik limit değeri tespit edildi. Plastik limit deneyi 3 kez yapıldı, bulunan su içeriklerinin ortalaması alınıp plastik limit değeri bulundu. Yapılan üç deneyde su içerikleri ; % 19,6 , % 20,1 ve % 19,7 olarak bulundu. Bu üç değerın ortalaması alınarak plastik limit değeri $\omega_P = 19,8$ (%) olarak tespit edildi.

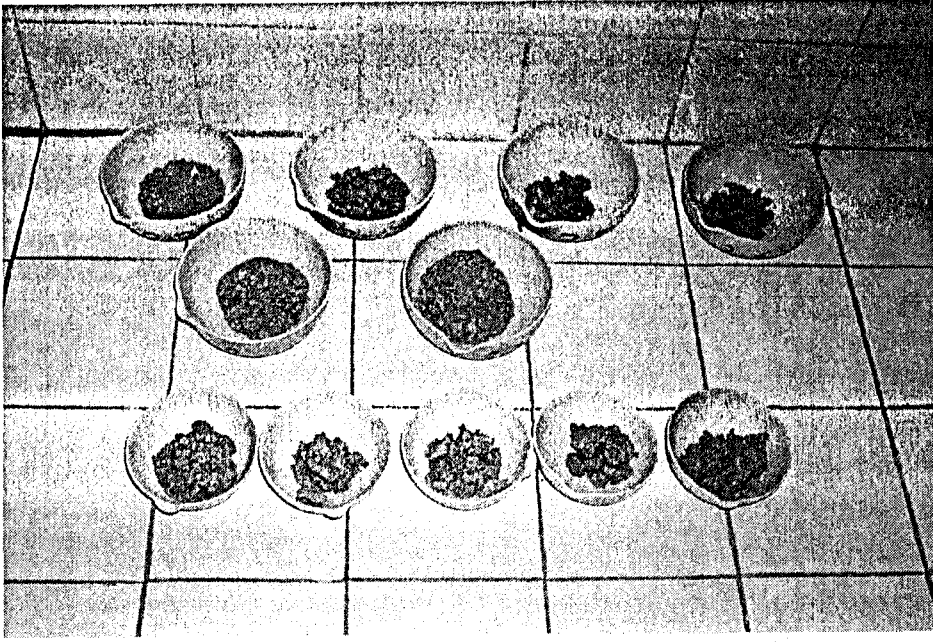
Plastisite İndisi (I_P) ' de likit limit ile plastik limit arasındaki fark alınarak bulundu. $I_P = 32,4 - 19,8 = 12,6$

Bu deneyler sonucunda , elek analizi sonuçları, likit limit, plastik limit, plastisite indisi, derecelenme katsayısı ve ünifomluk katsayısı değerlendirilerek TS 1500' e göre yapılan “ Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi “ ne göre deneylerde kullanılan zeminin türü belirlendi. Zeminin, 200[#] no'lu elekten geçen kısmı % 5,8 olduğundan, bu değer % 5 ile % 12 arasında kaldığından zeminin çift sembolle isimlendirilmesi gerekir. Likit Limit ($\omega_L = 32,4$) ve Plastisite indisi ($I_P = 12,6$) değerleri Cassagrende Plastisite kartına işlendi. Bu iki değerin kesiştiği nokta A hattının üzerinde olduğundan ve derecelenme şartlarının :

Derecelenme Katsayısı : $C_c = 1,2$ (1 ile 3 arasında olmalı),

Ünifomluk Katsayısı : $C_u = 4,6$ ($C_u > 6$ olmalı)

ikisi birden sağlanmadığından deneylerde kullanılan zeminin **Kötü Derecelenmiş Killi Kum (SP-SC)** olduğu tespit edildi (TS 1500, 1974).



Resim 3.3. Su İçeriği Deneyinde Numunelerin Ettüvden Çıktıktan Sonraki Görünümü

3.2.4. Standart Procktor Deneyi

Bu deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış zeminde maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren su içeriğine yakın su içeriklerinde birim hacime sığacak en çok zemin ağırlığının bulunmasını kapsar. Serbest basınç mukavemeti, ıslatma – kurutma ve donma – çözülme deneylerinde kullanılan numunelerin, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını ve optimum su içeriklerini tespit etmek için Standart Procktor kalıbında, değişik oranlarda karışımlar için numuneler hazırlandı. Deney, açık havada kurutulup 20 mm'lik elekten geçirilen zemin üzerinde TS 1900'e göre yapıldı. Zemin numunesi, 943 cm³'lük Procktor kalıbına üç eşit tabaka halinde konularak, her tabakaya, 2,5 kg. ağırlığındaki standart tokmağın 30,5 cm. yükseklikten 25 defa düşürülmesi suretiyle sıkıştırıldı (TS 1900, 1987). Sıkıştırılan zemin numunelerinin ağırlıkları tespit edildi, kuru birim hacim ağırlıkları hesaplandı ve kalıptan çıkarılan zeminden alınan küçük bir numune ile su içerikleri tespit edildi. Bu işlemler farklı su içeriklerinde hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlanarak Procktor eğrisi çizildi ve optimum su içeriği ve

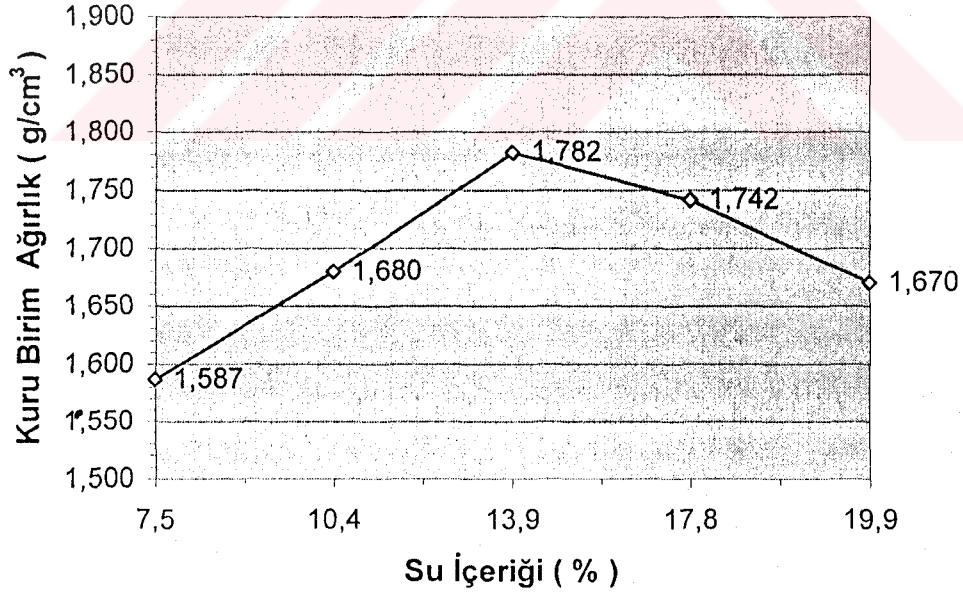
maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edildi (Umar, Yayla, 1986 ; TS 1900, 1987).

Stabilizasyon için hazırlanan zemin üzerinde procktor deneyi yapıldı. Deney sonuçları Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Zemine Uygulanan Proctor Deneyi Sonuçları

Kuru Birim Hacim Ağırlık (g/cm^3)	Su İçeriği %
1,587	7,5
1,680	10,4
1,782	13,9
1,742	17,8
1,670	19,9

Şekil3.2de zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve su içeriği grafik olarak gösterildi.



Şekil 3.2. Zeminin Procktor Eğrisi

TS 1900' e göre yapılan deney sonucunda zemine ait kuru birim hacim ağırlık su içeriği bağıntısı tespit edildi. Buna göre :

Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık $\gamma_{k \max} = 1,782 \text{ g/cm}^3$,

Optimum Su İçeriği $\omega_{\text{opt}} = 13,9 (\%)$ değerleri bulundu.

Resim 3.4'de procktor deneyinde numunenin sıkıştırılması görülmektedir.



Resim 3.4. Numunelerin Otomatik Kompaktör ile Sıkıştırılması

Zemine % 2 - 4 - 6 - 8 - 10 oranlarında çimento katılarak yapılan procktor deneyi sonucunda; çimento-optimum su içeriği eğrisi çizildi (Şekil 3.3). Eğride, artan çimento oranlarında optimum su içeriğinin artış gösterdiği görüldü. Zemin çimento karışımının çeşitli çimento oranlarına göre kuru birim hacim ağırlığı değişimi Şekil 3.4'de gösterildi.

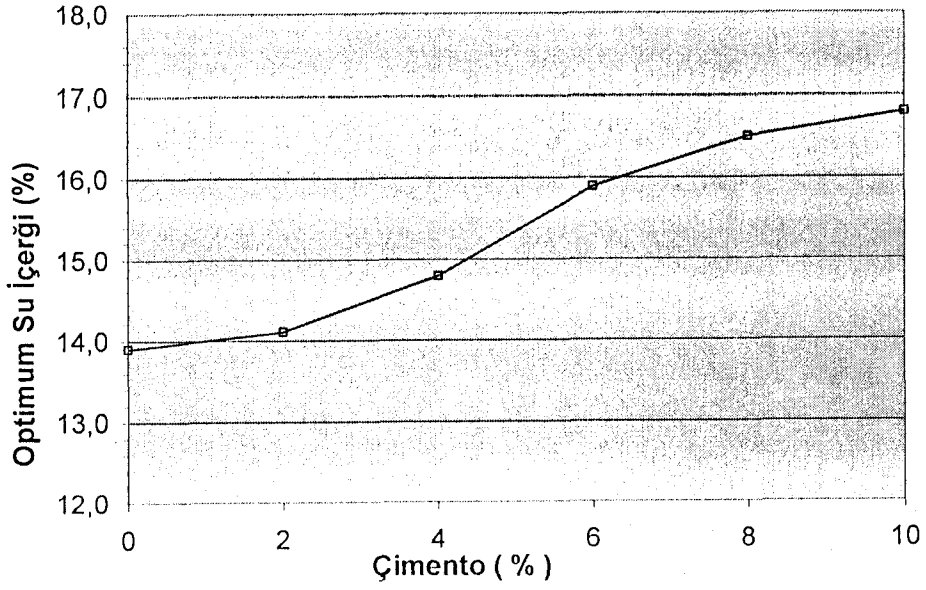
Eğride, %4 çimento oranına kadar maksimum kuru birim hacim ağırlıkların artış gösterdiği, bu değerden fazla çimento oranlarında azaldığı görüldü.

Ayrıca Proctor deneyi, zemine % 2 - 4 - 6 - 8 - 10 oranlarında katılan her bir çimento oranı için % 1- 3 - 5 - 7 - 9 oranlarında cüruf karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde yapıldı. Her bir oran için ayrı ayrı optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edildi (Tablo 3.5).

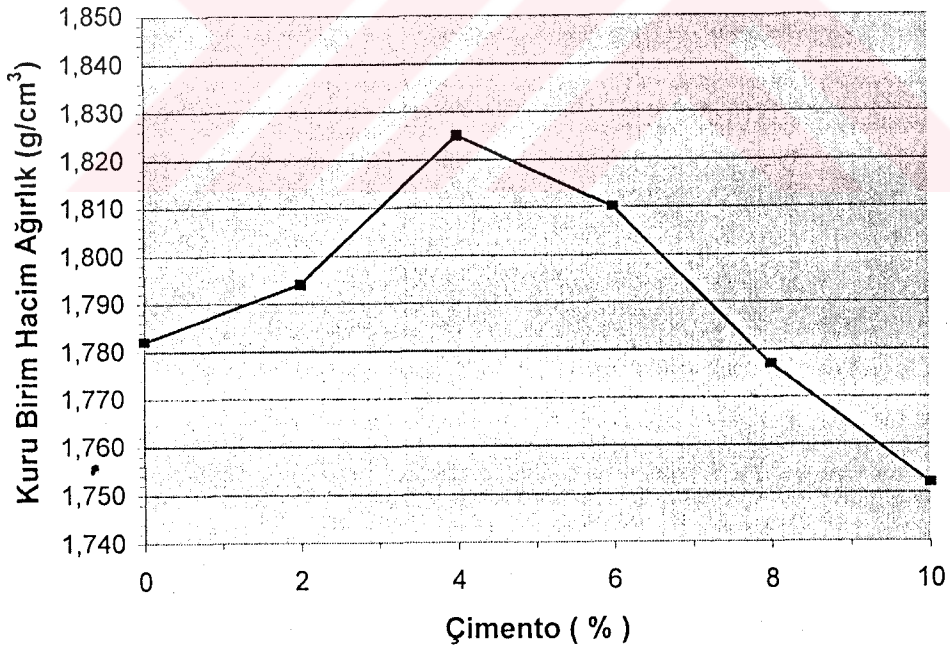
Zemin - çimento - cüruf karışımlarında, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6' da görüldüğü gibi cüruf oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmakta, optimum su içerikleri ise; önce artmakta, her bir çimento oranı için % 5 cüruf oranında maksimuma ulaşmakta, sonra azalmaktadır.

Tablo 3.5. Değişik Karışımlar İçin Serbest Basınç Mukavemeti ve Standart Procktor Deneyi Sonuçları

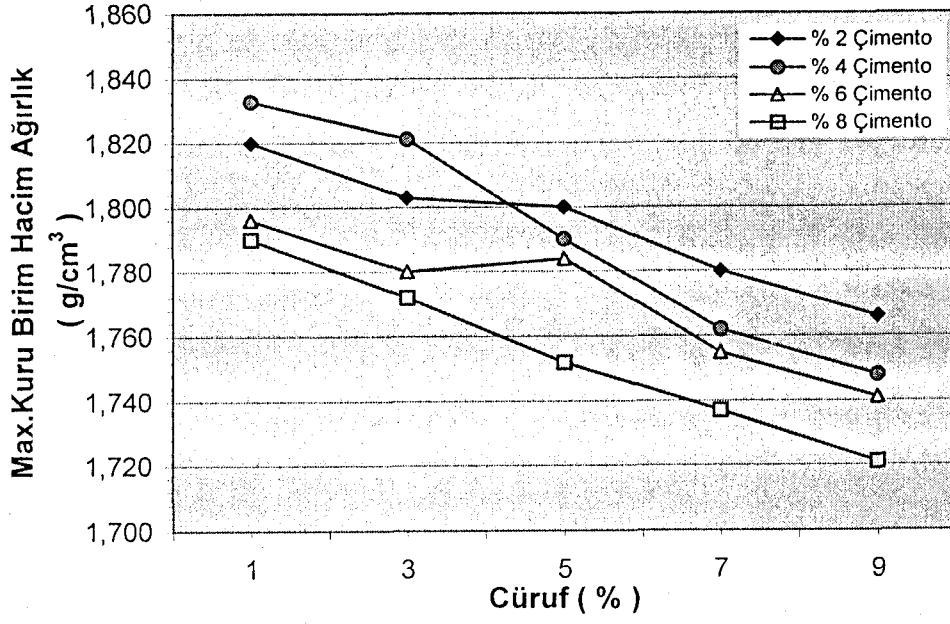
Karışım Oranları (Ağırlıkça %)		7 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti (kg/cm ²)	Max. Kuru Birim Hacim Ağırlıkları (g/cm ³)	Optimum Su İçeriği (%)
Çimento	Cüruf			
-	-	3,2	1,782	13,9
2	-	6,0	1,794	14,1
4	-	13,6	1,825	14,8
6	-	16,1	1,810	15,9
8	-	21,5	1,777	16,5
10	-	24,6	1,752	16,8
2	1	6,3	1,820	14,6
2	3	8,8	1,803	15,4
2	5	14,2	1,800	15,8
2	7	14,0	1,780	15,1
2	9	13,7	1,766	14,4
4	1	14,4	1,833	15,2
4	3	15,8	1,821	15,5
4	5	21,9	1,790	16,4
4	7	21,4	1,762	15,8
4	9	20,0	1,748	15,3
6	1	17,0	1,796	16,0
6	3	20,5	1,780	16,7
6	5	25,3	1,784	17,6
6	7	25,1	1,755	17,0
6	9	24,5	1,741	16,0
8	1	22,1	1,790	17,1
8	3	23,8	1,772	17,5
8	5	29,5	1,752	18,0
8	7	29,1	1,737	17,1
8	9	28,6	1,721	16,4



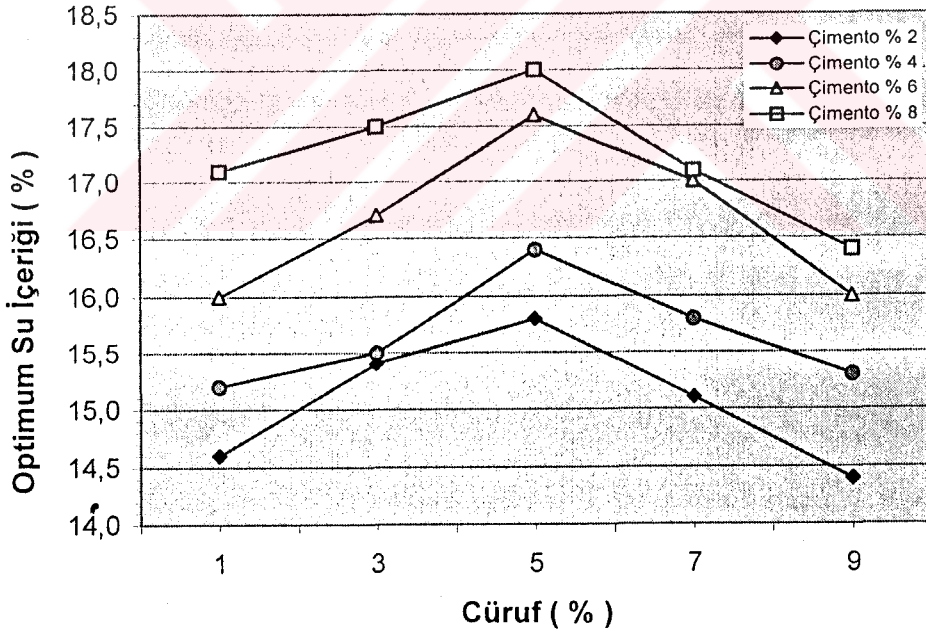
Şekil 3.3. Çeşitli Çimento Oranları İçin Optimum Su İçerikleri Eğrisi



Şekil 3.4. Çeşitli Çimento Oranları İçin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları Eğrisi



Şekil 3.5. Değişik Oranlardaki Karışımların Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklarının Cüruf ve Çimento ile Değişimi

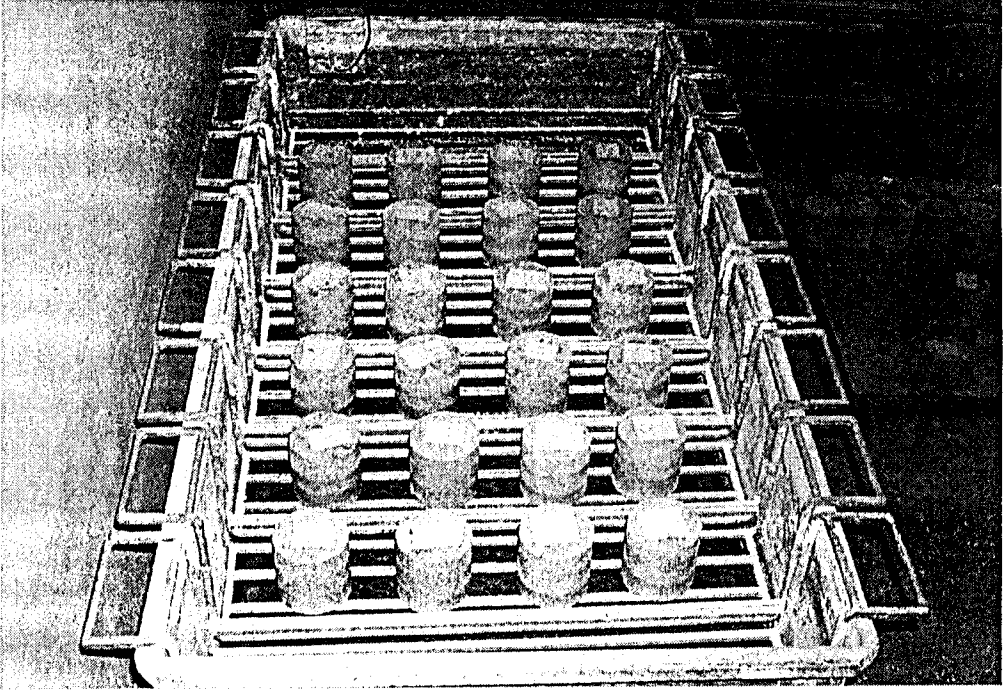


Şekil 3.6. Değişik Oranlardaki Karışımların Optimum Su İçeriklerinin Cüruf ve Çimento ile Değişimi

3.2.5. Serbest Basınç Mukavemetinin Ölçümü

Deney, Standart Procktor kalıbında sıkıştırılarak hazırlanan, zemin, zemin – çimento ve zemin – çimento – cüruf karışımları üzerinde yapıldı. Hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin ölçümü, *Versa Tester (Solitest, INC. Evanston, ILL., USA)* marka maksimum 15 ton yük verebilen preste yapıldı. Kullanılan zemin olarak 3/4" lik elekten geçen malzeme alındı. Numuneler, Standart Procktor deneyinde tespit edilen optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları değerlerinde hazırlandı. Her bir oran için 3'er adet numune hazırlandı.

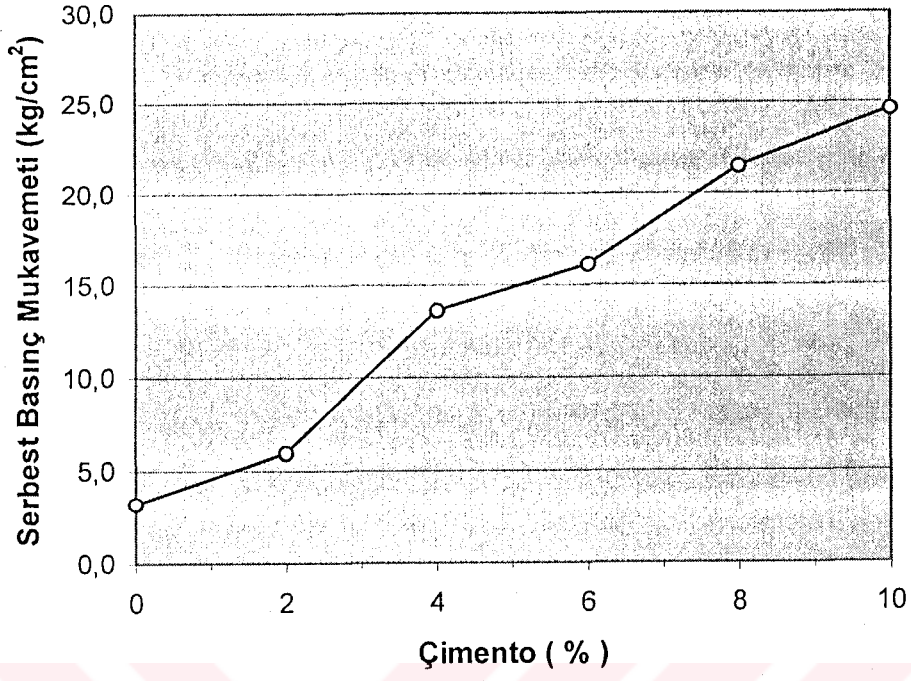
Deney, önce zemine çimento ve cüruf katılmadan yapıldı. Sonra zemine % 2 – 4 – 6 – 8 - 10 oranlarında çimento katılarak hazırlanan numunelerle yapıldı. Daha sonra, her çimento oranı için zemin – çimento karışımına % 1 – 3 – 5 – 7 – 9 oranlarında cüruf katılarak elde edilen, zemin – çimento – cüruf karışımı ile hazırlanan numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetleri ölçüldü. Numuneler, rutubetli ortamda 7 gün kür edilerek muhafaza edildi. Kürden sonra numunelerin serbest basınç mukavemetleri ölçüldü. Her oran için ayrı ayrı hazırlanan 3'er numunenin serbest basınç mukavemet değerlerinin ortalaması alındı. Bulunan 7 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri Tablo 3.5'de verilmiştir. Resim 3.5'de numunelerin kür havuzunda bekletilmesi görülmektedir.



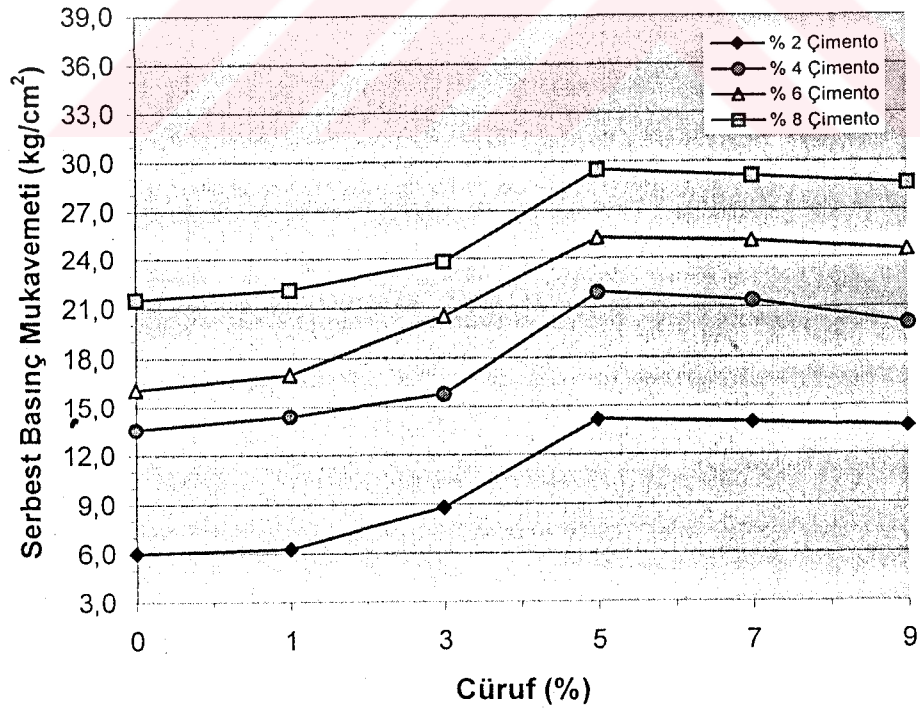
Resim 3.5. Numunelerin Kür Havuzundaki Görünümü

Zemin çimento karışımı ile yapılan serbest basınç deneyinde çimento oranı arttıkça karışımın basınç mukavemeti de artmaktadır (Şekil 3.7).

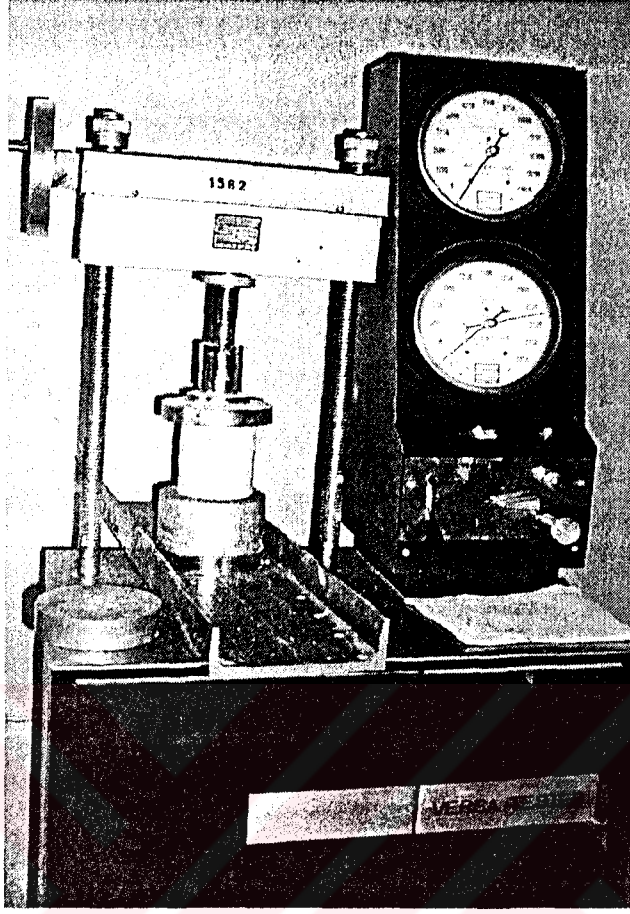
Yapılan tespitler incelendiğinde aynı çimento oranları için cüruf ilavesiyle daha yüksek serbest basınç mukavemeti elde edildiği görülmektedir. Çimento oranları % 2 – 4 – 6 – 8 değerlerinde iken cüruf, % 5 değerinde optimum değere gelmektedir. Bu değerden daha fazla oranlarda cüruf katıldığında serbest basınç mukavemetleri artış göstermemekte hatta bir miktar düşüş göstermektedir (Şekil 3.8).



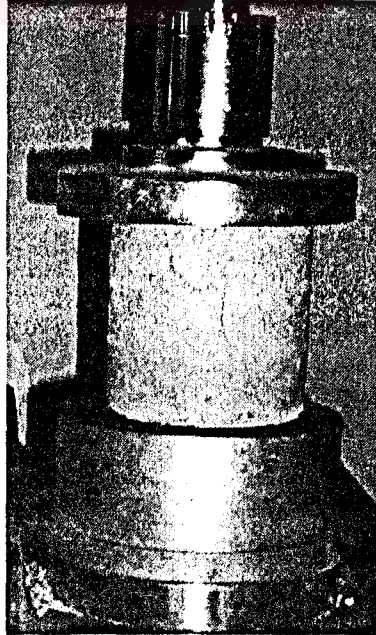
Şekil 3.7. Zeminin Serbest Basınç Mukavemetinin Çimento İle Değişimi



Şekil 3.8. Değişik Oranlardaki Karışımların Serbest Basınç Mukavemetlerinin Cüruf ve Çimento ile Değişimi



Resim 3.6. Serbest Basınç Mukavemeti Ölçümü

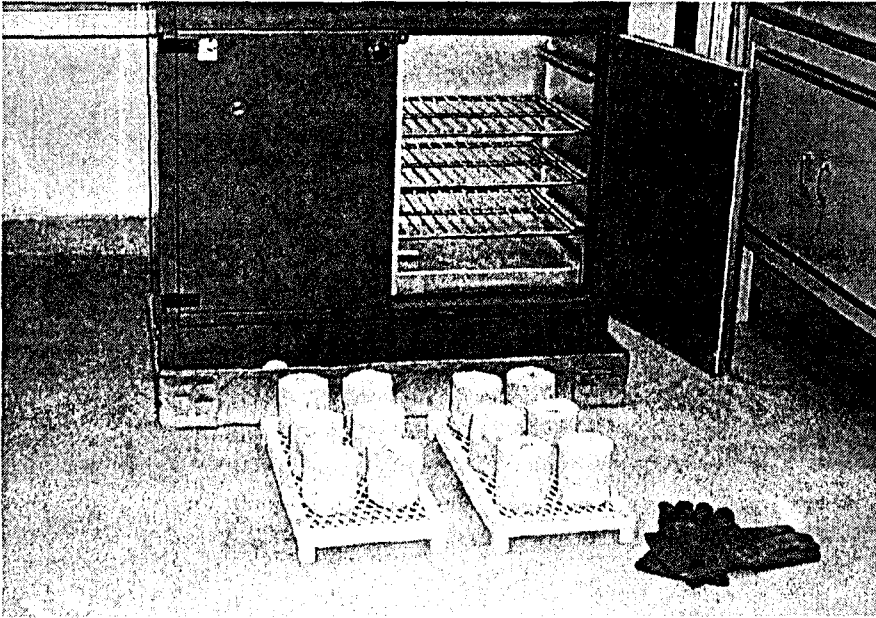


Resim 3.7. Serbest Basınç Mukavemeti Ölçümünde Maksimum Yük Anında Numunenin Görünümü

3.2.6. Islatma- Kurutma Deneyi

Zemin, zemin-çimento, zemin-çimento-cüruf karışımlarının iklim değişikliklerine ve rutubet değişikliklerine maruz kaldıklarında bu etkilere karşı dayanıklılık durumlarının tespit etmek amacıyla ıslatma-kurutma deneyleri yapılır. Özellikle killi ve siltli zeminlerde ıslatma-kurutma deneylerinin sonuçları önemlidir. Bahsedilen zeminler kurudukları zaman büyük hacim değişikliklerine uğrar. Granüler zeminlerde ve tek boy kumlarda ıslatma-kurutma deneyi sonucu zayıf yüzdeleri killi - siltli zeminlere göre daima daha fazla olur. Bunun sebebi numunelerinin fırçalanması sırasında kum danelerinin numuneden sökülerek çıkmasıdır (Alataş, 1989).

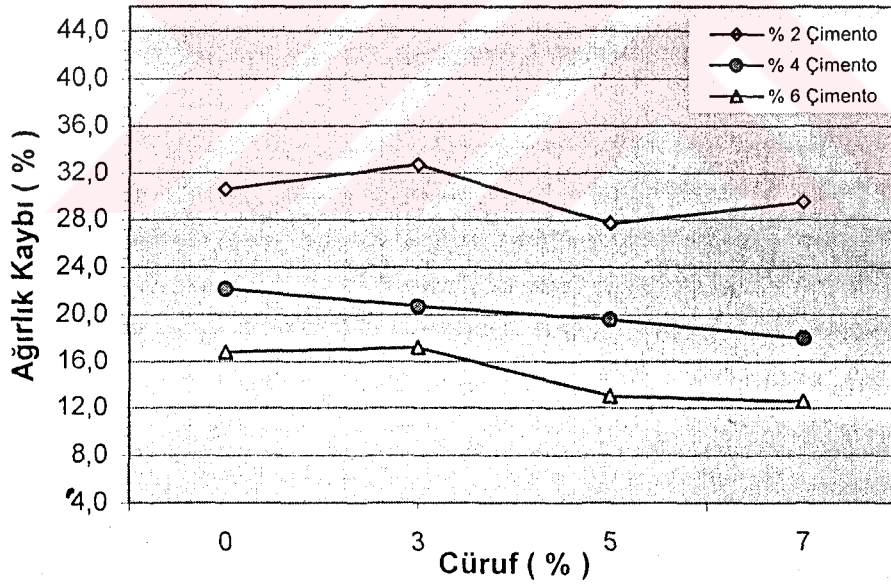
Deneyde kullanılan zemin 3/4" eleğinden elenerek, değişik oranlarda ve optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırılarak hazırlanan numuneler 7 gün küre tabi tutulduktan sonra 12 devre ıslatılıp kurutuldu ve her devre sonunda fırçaladı. Sonuçta etüvde 110°C de 24 saat bekletilip tamamen kurutuldu. Yapılan tartı işlemleri sonucunda her bir numunenin uğradığı ağırlık kayıpları tespit edildi. Deneyde her bir devrede numuneler, ıslatma fazında 5 saat suda bekletildi, kurutma fazında ise etüvde 71°C de 42 saat bekletildi. Deney sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları, Tablo 3.6' da ve ağırlık kayıpları-cüruf ilişkisi Şekil 3.9'da verilmiştir. Resim 3.8'de numunelerin etüvden çıkartıldıktan sonraki halleri görülmektedir.



Resim 3.8. Numunelerin Kurutma Fazında Etüvden Çıkarıldıktan Sonraki Görünümleri

Tablo 3.6. Islatma – Kurutma Deneyleri Sonuçları

Karışım Oranları (Ağırlıkça %)		Islatma - Kurutma Ağırlık Kaybı %
Çimento	Cüruf	
2	-	30,6
2	3	32,7
2	5	27,7
2	7	29,5
4	-	22,2
4	3	20,7
4	5	19,6
4	7	18,0
6	-	16,8
6	3	17,2
6	5	13,0
6	7	12,6



Şekil 3.9. Islatma – Kurutma Deneyi Sonuçları

3.2.7. Donma - Çözülme Deneyi

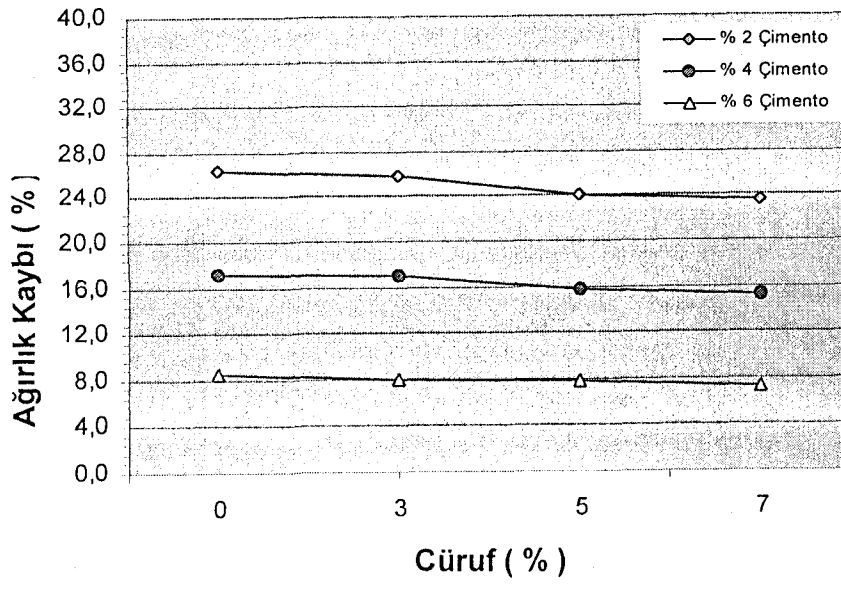
Bu deney, yeterli derecede sertleşmiş zemin, zemin-çimento ve zemin-çimento-cüruf karışımlarının don olayına karşı dayanıklılık durumunun tespit edilmesi amacıyla yapılır. Donma ve çözülmeden siltli ve killi zeminler, kumlu ve çakıllı zeminlere göre daha fazla etkilenirler (Alataş,1989).

Deneyde kullanılan zemin 3/4" eleğinden elenerek, değişik oranlarda ve optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırılarak hazırlanan numuneler 7 gün küre tabi tutulduktan sonra, 12 devre donma – çözülme periyotlarına tabi tutularak, her bir devre sonunda fırçalandı. 12 devrenin sonunda etüvde 110°C de 24 saat bekletildi. Yapılan tartı işlemleri sonucunda her bir numunenin uğradığı ağırlık kayıpları tespit edildi. Deneyde her bir devrede numuneler, donma halinde 22 saat -23°C de bekletildi, çözülme halinde ise oda sıcaklığında rutubetli ortamda 22 saat bekletildi (Kumbasar ,1970).

Deney sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları, Tablo 3.7' de ve ağırlık kayıpları-cüruf ilişkisi Şekil 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.7. Donma Çözülme Deneyleri Sonuçları

Karışım Oranları (Ağırlıkça %)		Donma - Çözülme Ağırlık Kaybı (%)
Çimento	Cüruf	
2	-	26,4
2	3	25,9
2	5	24,0
2	7	23,6
4	-	17,1
4	3	17,0
4	5	15,8
4	7	15,3
6	-	8,5
6	3	8,0
6	5	7,7
6	7	7,2



Şekil 3.10. Donma – Çözülme Deneyi Sonuçları

4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE EKONOMİK ANALİZ

4.1. Dency Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan deneyler sonucunda zemine çimento katılmasıyla elde edilen değer artışları yanında, çimentonun bir kısmı yerine cüruf ilavesi ile de birbirine yakın mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Zemine değişik oranlarda çimento katılarak optimum su içerikleri belirlendiğinde, karışıma cüruf ilavesiyle % 5 cüruf oranında optimum su içeriği maksimum değere ulaşmakta , bu değerden az veya fazla oranda cüruf katıldığında optimum su içeriği azalmaktadır.

Zemin - çimento – cüruf karışımında cüruf oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklar azalmaktadır.

Zemin – çimento karışımlarından hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti ölçümleri sonucunda elde edilen basınç mukavemetlerinde, her bir çimento oranı için ayrı ayrı cüruf ilave edilmesiyle artış olduğu görülmüştür.

Önce zemine herhangi bir katkı katılmadan hazırlanan numune ile 7 günlük kür uygulamasından sonra yapılan ölçüm sonucunda $3,2 \text{ kg/cm}^2$ 'lik serbest basınç mukavemeti elde edilmesine karşılık, %2 çimento ilavesiyle bu değer $6,0 \text{ kg/cm}^2$ ' ye çıkmıştır. Zemin - çimento karışımlarına cüruf ilavesi ile de serbest basınç mukavemetlerinin yükseldiği görülmüştür.

Örneğin; % 2 çimento oranı ile 7 günlük kür uygulamasından sonra $6,0 \text{ kg/cm}^2$ 'lik basınç mukavemeti aynı çimento oranı için % 3 cüruf ilavesi ile $8,8 \text{ kg/cm}^2$ ' ye , % 5 cüruf ilavesi ile de $14,2 \text{ kg/cm}^2$ ' ye çıkmıştır.

Zemine; % 8 çimento katılarak elde edilen $21,5 \text{ kg/cm}^2$ 'lik basınç mukavemetinden daha büyük mukavemetler, zemine % 4 çimento - % 5 cüruf katılmasıyla elde edilmiştir.

Zemine % 10 çimento katılarak serbest basınç mukavemeti $24,6 \text{ kg/cm}^2$ elde edilmiş, yine bu değere yakın mukavemet değerleri % 6 çimento ve % 5 cüruf ilave edilmesiyle elde edilmiştir.

Ayrıca % 6 çimento ve % 3 cüruf ile elde edilen $20,5 \text{ kg/cm}^2$ 'lik serbest basınç mukavemeti, çimento % 2 azaltılarak , % 4 çimento ve % 5 cüruf ile $19,2 \text{ kg/cm}^2$ olarak elde edilmiştir.

Bu değerlerle birlikte, zemin – çimento – cüruf karışımlarında maksimum basınç mukavemetleri, % 5 cüruf değerinde bulunmuştur.

Bu durum stabilizasyonda kullanılan çimentonun bir miktarının yerine cüruf kullanılarak aynı değerlere yakın basınç mukavemetlerinin elde edilebileceğini ve bu sonucun çimentodan ağırlıkça % 2 - 4 oranlarında bir ekonomi sağlanabileceğini göstermiştir.

Zemine belli oranlarda çimento katılarak hazırlanan numunelerin ıslatma - kurutma ve donma – çözülme deneyleri sonucunda uğradıkları ağırlık kayıpları belirli değerlerde iken, karışıma cüruf ilavesi ile ıslatma - kurutma ve donma – çözülme deneyleri sonucunda uğradıkları ağırlık kayıpları belirli ölçüde azalmaktadır.

4.2. Çimento ile Cürufun Ekonomik Analizi

Yapılan deneysel çalışmalar ışığında, çimento ile cürufun stabilizasyonda belli bir oranda yer değiştirme durumunun ekonomik olup olmadığının araştırılması için maliyet hesabı yapılması gerekmiştir. Bu amaçla, Fırat Üniversitesi Kampüsünde yapılacak bir stabilizasyon işi için, çimentonun (Elazığ Çimento Fabrikasına ortalama 6 km.) ve Sivas Demir-Çelik Fabrikası cürufunun (370 km.) maliyetinin hesabı ve karşılaştırması yapılmıştır.

4.2.1. Çimento Maliyeti (Bayındırlık Bak. 2000 Yılı Birim Fiyatlarına Göre)

Çimento maliyeti olarak, çimentonun piyasa fiyatı alınıp, fabrika ile şantiye arası motorlu taşıt ile nakliye bedeli ve boşaltma ve istif bedeli eklenerek hesaplanmıştır.

Bayındırlık Bakanlığı birim fiyat tarifleri ve eki fiyat listesinden Poz No: 04.008 Portland Çimentosu fiyatı : 22,000,000 TL/ton.

Çimentonun 11.09.2000 tarihli zamlı satın alma fiyatı : 33,200,000 TL/ton

Çimento Nakliye Analizi (Bayındırlık Bakanlığı Taşıma Genel Teknik Şartnamesi karayolu taşıma formüllerine göre)

K= 28,500,000 TL/gün (02.017 Motorlu araç taşıma katsayısı)

A= 1,5 (Yolun fiziki durumu ve kaplaması ile ilgili katsayı)

M= 6 km.= 6000 m. (Fabrika - şantiye arası taşıma mesafesi)

$$F= A \times K \times \sqrt{M} \times 0,00017=$$

$$F=1,5 \times 28,500,000 \times \sqrt{6000} \times 0,00017 = 562,938 \text{ TL/ton}$$

$$\% 25 \text{ Mütcahhit karı ve genel gid. : } 562,938 \times 0,25 = 140,735 \text{ TL/ton}$$

$$703,673 \text{ TL/ton}$$

$$09.001/1 \text{ Boşaltma-İstif : } 658,000 \times \frac{2}{3} = 438,667 \text{ TL/ton}$$

Toplam : 1,142,340 TL/ton

Çimento Bedeli : 33,200,000 TL

Nakliye : 1,142,340

1 ton Çimento Maliyeti : 34,342,340 TL

4.2.2. Cüruf Maliyeti (Bayındırlık Bak. 2000 Yılı Birim Fiyatlarına Göre)

Cüruf maliyeti olarak, cürufun nakliye bedeli ve hazırlama bedelleri hesaplanmıştır. Cürufun Sivas Demir-Çelik Fabrikası atık deposundan bedelsiz olarak alındığı düşünülerek sadece depodan işyerine kadar nakliye giderleri hesaplanmıştır. Cürufun hazırlama bedeli ise, cüruf danelerinin depodaki tabii durumda değişik boyutlarda olması sebebiyle, konkasörde kırılıp, parçalanması ve elekten geçirilerek stabilizasyonda kullanılabilecek boyutlara getirilmesi için yapılacak giderlerdir.

Cüruf Nakliye Analizi :

Cürufun, Sivas Demir-Çelik Fabrikası atık deposundan alınarak konkasör önüne getirilmesi için iki ayrı nakliye yapılması gerekmektedir. Bayındırlık Bakanlığı Taşıma Genel Teknik Şartnamesi'ne göre; bu tür işlerde taşımaların Devlet Demiryolları ile yapılması gerekmektedir. Bu sebeple, cürufun Sivas Demir-Çelik Fabrikası atık deposundan Elazığ Gar'ına kadar

demiryolu ile 30'ar tonluk vagonlarla taşındığı, Gar'dan işyerine de motorlu taşıt ile taşındığı düşünülerek analiz yapılmıştır.

- Sivas Demir-Çelik Fabrikasından Elazığ Garı'na 30'ar tonluk vagonlarla 1 ton demir cürufu nakliyesi : 3,058,000 TL. (TCDD Elazığ Ambar Müd. Yazısı)
- Elazığ Garı ile İşyeri arası motorlu taşıt ile nakliye (M=5 km=5000 m):

$$F = A \times K \times \sqrt{M} \times 0,00017 =$$

$$F = 1,5 \times 28,500,000 \times \sqrt{5000} \times 0,00017 = 513,890 \text{ TL/ton}$$

$$\% 25 \text{ Müt. karı ve gen.gid.: } 513,890 \times 0,25 = 128,473 \text{ TL/ton}$$

$$642,363 \text{ TL/ton}$$

Cüruf Hazırlama :

03.530 Konkasörün 1 saatlik ücreti

Poz No	İşin Adı	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
03.530/1	Makine(Konkasör)	0,000171	25,867,072,000	4,423,269
04.109	Mazot ve yağ	27,0 kg.	354,000	9,558,000
01.409	Formen	0,48 sa.	1,154,048	553,943
01.403	Makinist	2,88 sa.	804,320	2,316,442
01.408	Yağcı	4,00 sa.	593,760	2,375,040
01.501	Düz işçi	3,00 sa.	526,400	1,579,200
Toplam :				20,805,894 TL/sa

03.521 Lastik Tekerlekli Yükleycinin 1 saatlik ücreti

Poz No	İşin Adı	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
03.521/1	Makina (Yükleyici) Amortisman, Yedek Parça, Bakım vs.	0,0002	27,530,272,000	5,506,054 .
04.109	Mazot ve yağ	14,4 kg.	354,000	5,097,600 .
01.404	Operatör	1,44 sa.	915,520	1,318,349 .
01.408	Yağcı	1,00 sa.	593,760	593,760 .
Toplam :				12,515,763 TL/sa

Cüruf Kırma ve Eleme Maliyeti (1 m³ için)

Poz No	İşin Adı	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
03.521	Konkasöre, taşıtlara yükleme ve konk.altı boşaltma	0,030	12,515,763	375,473
03.530	Kırma ve Eleme	0,060	20,805,894	1,248,354
01.409	Formen	0,25 sa.	1,154,080	288,520
01.501	Düz işçi	0,05 sa.	526,400	26,320
Toplam :				1,938,667 TL/m³
% 25 Mütcahlhit karı ve genel giderler: 1,938,667x0,25 :				484,667 TL/m³
Toplam :				2,423,334 TL/m³
1 ton Cüruf Kırma ve Eleme Maliyeti 2,423,334 TL/m ³ / 1,339 ton/m ³				1,809,809 TL/ton

TCDD ile Sivas-Elazığ arası nakliye : 3,058,000/1,17 (KDV)= 2,613,675 TL/ton

Gar- İşyeri arası nakliye 642,363 TL/ton

Cüruf hazırlama bedeli + 1,809,809 TL/ton

Cürufun Toplam Maliyeti (Hazırlama ve Nakliye) 5,065,847 TL/ton

4.2.3. Aynı Mukavemeti Veren Zemin-Çimento ve Zemin-Çimento-Cürufun Ekonomik Karşılaştırılması

Tablo 3.5 'de verilen, çeşitli oranlardaki zemin, zemin-çimento ve zemin-çimento-cüruf numunelerinden elde edilen optimum su içerikleri, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve serbest basınç mukavemetlerinin incelenmesi sonucunda ;

- % 8 çimento ile elde edilen mukavemet, %4 çimento ve % 5 cüruf ile,
- %10 çimento ile elde edilen mukavemet, %6 çimento ve % 5 cüruf ile,
- % 8 çimento ve % 3 cüruf ile elde edilen mukavemet, % 6 çimento ve % 5 cüruf ile elde edilmiştir.

Buna göre verilen ilk iki örnek için, çimento % 4 oranında azaltılıp yerine % 5 oranında cüruf kullanılması ve üçüncü örnek için çimento % 2 azaltılıp yerine % 2 oranında cüruf kullanılması durumlarının maliyetleri hesaplanarak karşılaştırması yapılmıştır. Yapıldığı düşünülen stabilizasyon işi için örnek olarak 1000 m³ zeminin kullanıldığını kabul edilmiştir.

Kullanılan zemin ağırlığı : $1000 \text{ m}^3 \times 1,640 \text{ ton/m}^3 = 1640 \text{ ton}$.

Çimento Maliyeti :

% 2 Çimento oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,02 = 32,8 \text{ ton}$

$$32,8 \text{ ton} \times 34.342.340 \text{ TL/ton} = 1.126.428.752 \text{ TL}$$

% 4 Çimento oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,04 = 65,6 \text{ ton}$

$$65,6 \text{ ton} \times 34.342.340 \text{ TL/ton} = 2.252.857.504 \text{ TL}$$

% 6 Çimento oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,06 = 98,4 \text{ ton}$

$$98,4 \text{ ton} \times 34.342.340 \text{ TL/ton} = 3.379.286.256 \text{ TL}$$

% 8 Çimento oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,08 = 131,2 \text{ ton}$

$$131,2 \text{ ton} \times 34.342.340 \text{ TL/ton} = 4.505.715.008 \text{ TL}$$

%10 Çimento oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,10 = 164,0 \text{ ton}$

$$164,0 \text{ ton} \times 34.342.340 \text{ TL/ton} = 5.632.142.760 \text{ TL}$$

Cüruf Maliyeti :

% 3 Cüruf oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,03 = 49,2 \text{ ton}$

$$49,2 \text{ ton} \times 5.065.847 \text{ TL} = 249.239.672 \text{ TL}$$

% 5 Cüruf oranı için : $1640 \text{ ton} \times 0,05 = 82,0 \text{ ton}$

$$82,0 \text{ ton} \times 5.065.847 \text{ TL} = 415.399.454 \text{ TL}$$

Örnek 1 :

Hesaplanan parasal değerlere göre , stabilizasyonda sadece % 8 oranında çimento kullanılması durumunda çimento maliyeti 4.505.715.008 TL. olacaktır. % 8 çimento ile elde edilen mukavemetler, % 4 çimento ve % 5 cüruf ile sağlandığına göre;

çimento + cüruf maliyeti : $2.252.857.504 + 415.399.454 = 2.668.256.958$ TL olacaktır. Bu durumda: $4.505.715.008 - 2.668.256.958 = 1.837.458.050$ TL.lik ekonomi sağlanacağı görülmektedir. Bu sayısal örneğe göre % 40 ekonomi sağlanabilecektir.

Örnek 2:

% 10 oranında çimento kullanılması durumunda çimento maliyeti 5.632.142.276 TL. olacaktır. % 10 çimento ile elde edilen mukavemetler % 6 çimento ve % 5 cüruf ile sağlandığına göre;

çimento + cüruf maliyeti : $3.379.286.256 + 415.399.454 = 3.794.685.710$ TL olacaktır. Bu durumda $5.632.142.276 - 3.794.685.710 = 1.837.456.566$ TL.lik ekonomi sağlanacağı görülmektedir. Bu sayısal örneğe göre % 40 ekonomi sağlanabilecektir.

Örnek 3:

% 8 oranında çimento ve % 3 oranında cüruf kullanılması durumunda çimento+cüruf maliyeti : $4.505.715.008 + 249.239.672 = 4.754.954.680$ TL. olacaktır. % 8 oranında çimento ve % 3 oranında cüruf ile elde edilen mukavemetler % 6 çimento ve % 5 cüruf ile sağlandığına göre;

çimento + cüruf maliyeti : $3.379.286.256 + 415.399.454 = 3.794.685.710$ TL olacaktır. Bu durumda $4.754.954.680 - 3.794.685.710 = 960.268.970$ TL.lik ekonomi sağlanacağı görülmektedir. Bu sayısal örneğe göre % 20 ekonomi sağlanabilecektir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Zemin stabilizasyonu yapmak amacıyla laboratuvarda yapılan deneysel çalışmalarda, zemine çimento katılarak elde edilen numunelerin serbest basınç mukavetlerinin arttığı görülmüştür. Kullanılan çimentonun bir kısmı azaltılarak yerine cüruf ilave edilmesi durumunda da aynı mukavemet değerleri elde edilmiştir. Yapılan ekonomik analiz sonucuna göre de cürufun 370 km taşınarak stabilizasyonda çimentonun bir kısmının yerine kullanılması durumunda % 20-40 arasında ekonomi sağlanabileceği görülmüştür.

Stabilizasyonda cüruf kullanılması durumunda demir-çelik fabrikalarında büyük sorun haline gelen atık depolama sahası ihtiyacı kısmen de olsa ortadan kaldırılmış olacak ve atılan büyük miktarlardaki cürufun sebep olduğu çevre kirliliği önlenecektir. Cürufun atıl bir madde olmaktan çıkıp ekonomik değeri olan bir madde haline gelmesi sağlanacaktır. Ayrıca stabilizasyonda kullanılan çimento ve diğer malzemelerden ekonomi sağlanacaktır. Böylece, kısmen çevre kirliliği önlenecek ve ülke ekonomisine fayda sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Alataş, T., 1989, Yol İnşaatında Uçucu Küllerin Toprak-Çimento Stabilizasyonlarında Kullanımının Araştırılması. Yük. Lis. Tezi, F.Ü. Fen Bil. Enst., Elazığ.
- Atanur, A., 1966, Toprak-Çimento Stabilizasyonun Laboratuvar Deneyleri, Karayolları Genel Müd., Ankara.
- Bayındırlık Bakanlığı, Taşıma Genel Teknik Şartnamesi, 1999, Ankara.
- Bayındırlık Bakanlığı, Genel Fiyat Analizleri, 1999, Ankara.
- Bayındırlık Bakanlığı, 1999 Yılı Birim Fiyat Tarifleri Eki İnşaat Birim Fiyatları Listesi ve Rayiçleri, Ankara.
- Cilason, N., 1964, Toprak Stabilizasyonu, Karayolları Genel Müd., Yayın No:64, Ankara.
- Erdoğan, T., 1993, Atık Malzemelerin İnş. Endüstrisinde Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnş. Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Bidiriler Kitabı, Ankara, 1-8
- Kumbasar, V., Kumbasar, F., Önalp, A., 1970, Yol Mühendisleri İçin Zemin Mekaniği, Kısım 1, İ.T.Ü., İstanbul.
- Kumbasar, V., Kip., F., 1984, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, İstanbul
- Ilıcalı, M., 1988, Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul.
- T.C.D.D., 06,12,2000, Elazığ Ambar Müdürlüğü Yazısı
- TS 1500, 1974, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara.
- TS 1900, 1987, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, Ankara.
- TS 20, 1992, Çimento- Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar, Ankara.
- TS 130, 1978, Agregası Karışımlarının Elek Analizi Deneyi, Ankara.
- TS 3526, 1980, Agregada Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, Ankara.
- TS 3655, 1981, Beton Agregalarında Dona Dayanıklılık Deneyi, Ankara.
- TS 3694, 1981, Beton Agregalarında Aşınma Oranı Tayini, Ankara.
- TS 3529, 1980, Birim Hacim Ağırlık Tayini, Ankara.
- Umar, F., Ağar, E., 1985, Yol Üstyapısı, İ.T.Ü., İnş. Fak. İstanbul.
- Yıldırım, B., 1984, Yol İnşaatı, F.Ü. Müh. Fak. İnş. Müh.Böl., Elazığ.
- Yıldırım, B., 1998, Yol Malzemeleri Ders Notları F.Ü. Fen Bil. Enst. İnş. Müh. Anabilim Dalı, Elazığ.