

**KIRLENMİŐ PORSUK SEDİMENTLERİNİN  
İLAVE MALZEMELER İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Gökşin AKDENİZ**  
**Yüksek Lisans Tezi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Kasım – 2004**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gökşin AKDENİZ'in Kirlenmiş Porsuk Dip Sedimentlerinin Mühendislik Özellikleri ve İyileştirilmesi başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi **09.11.2004** tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard. Doç. Dr.Hakan KOYUNCU	
Üye	: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN	
Üye	: Yard. Doç. Dr.Müfide BANAR	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **16.12.2004** tarih ve **411/4** sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Altuğ İFTAR  
Enstitü Müdürü

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## KİRLENMİŞ PORSUK SEDİMENTLERİNİN İLAVE MALZEMLER İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

GÖKŞİN AKDENİZ

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:Yard.Doç.Dr.Hakan KOYUNCU

2004, 77 sayfa

Bu çalışmada, Porsuk nehrinin farklı noktalarında alınan dip sedimentleri üzerinde iyileştirme öncesi ve sonrasında geoteknik, fiziko-kimyasal ve mikro-yapısal özellikleri belirlenmiştir. İlave malzeme olarak sepiyolit, zeolit, uçucu kül, kireç ve çimento kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonunda Porsuk nehri sedimentlerinin geoteknik özellikleri, kirlilik durumu ve mikro-yapısal özellikleri belirlenmiştir ve bunlar kirlilik sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Porsuk Nehri Dip Sedimentleri, İyileştirme (Stabilizasyon) Yöntemi, Mikro-Yapısal Özellikler, Geoteknik Özellikler, Fiziko-Kimyasal Özellikler, Uçucu Kül (Fly Ash), Kireç, Portland Çimentosu, Zeolit, Sepiyolit

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **STABILIZATON OF CONTAMINATED PORSUK RIVER SEDIMENTS WITH ADDITIVE MATERIALS**

**GÖKŞİN AKDENİZ**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Engineering Program**

**Supervisor:Asis.Prof.Dr.Hakan KOYUNCU**

**2004, 77 pages**

**In this study, samples were taken from various locations in Porsuk River and geotechnical, physico-chemical and microstructural properties were determined for both before and after the stabilization. Additive materials such as fly ash, lime, cement, zeolites and sepiolites were used for stabilization. Properties of sediments with and without improvement are given. Stabilization methods are discussed according to experimental data.**

**Keywords:** Porsuk River Sediments, Pozzolonic Material, Stabilization Method, Micro-Structural Properties, Scanning Electron Microscopy, Water and Soil Contamination, Total Metal Content, Fly Ash, Lime, Portland Cement, Zeolite and sepiolite

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bana yol gösteren, bilgi ve deneyimiyle yardımlarını esirgemeyen tez danıőmanım sayın Yard. Doç. Dr. Hakan KOYUNCU'ya, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı personeline, Anadolu Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Islak Analiz Laboratuvarı personeline, Toprak ve Ekolojik Araştırmalar Enstitüsü Müdürlüğünden Salim TÜRKEK'e ve aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>RESİMLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1.Problemin Tanımı.....	2
1.2.Çalışmanın Kapsamı.....	3
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>5</b>
<b>3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>11</b>
3.1.Porsuk Nehri Dip Sedimentleri.....	11
3.2.Kireç.....	12
3.3.Portland Çimentosu.....	13
3.4.Zeolit.....	14
3.5.Sepiyolit.....	16
3.6.Uçucu kül.....	17
<b>4. DENEY YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>20</b>
4.1.Geoteknik Özellikler.....	20
4.1.1.Su Muhtevası, Su İçeriği, Kuru Madde.....	20
4.1.2.Ateşte Kayıp (Uçucu Madde) Miktarı ve Sabit madde Miktarı.....	21
4.1.3.Birim Hacim Ağırlığı.....	21
4.1.4.Dane Özgül Ağırlığı.....	24
4.1.5.Dane Çapı Dağılımı.....	22

4.1.6. Atterberg Kıvam Limitleri.....	22
4.2. Fiziko-Kimyasal Özellikler.....	23
4.2.1. pH Ölçümü.....	23
4.2.2. Katyon Değişimi Kapasitesi.....	24
4.2.3. Elektriksel İletkenlik.....	25
4.2.4. Organik Madde Miktarı.....	25
4.2.5. Toplam Metal Miktarı.....	26
4.3. Mikro-Yapısal Özellikler.....	36
4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu Fotoğrafları-SEM.....	36
4.3.2. X Işınları Kırınımı Analizi (XRD).....	37
4.4. İyileştirme Metodları.....	37
4.4.1. Fiziksel metodlar.....	37
4.4.2. Kimyasal metodlar.....	38
4.4.3. Biyolojik metodlar.....	39
4.4.4. Isıtma sistemleri.....	39
4.4.5. Diğer metodlar.....	39
4.4.6. İyileştirme (Stabilizasyon) Metodları.....	39
<b>5. SEDİMENTLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>41</b>
5.1. İstasyonlar.....	41
5.1.1. Çalca.....	41
5.1.2. Beşdeğirmen.....	42
5.1.3. Porsuk Barajı Girişi-Sabuncupınar Mevkii.....	42
5.1.4. Porsuk Barajı Çıkışı.....	44
5.1.5. Vişnelik.....	44
5.1.6. Tabakhane.....	45
5.1.7. Eskişehir Şeker Fabrikası Sonrası.....	46
5.1.8. Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisi Sonrası.....	46
5.2. Geoteknik Özellikler.....	47
5.2.1. Su muhtevası, Katı madde içeriği, Su içeriği, Uçucu madde, Sabit madde.....	47
5.2.2. Sedimentlerin dane çapı dağılımı ve sabit madde dağılımları.....	50

5.2.3.Sedimentlerin sınıflandırılması ve Atterberg kıvam limitleri.....	52
5.3.Fiziko-kimyasal Özellikler.....	55
5.3.1.Sedimentlerin Katyon Değişim Kapasitesi.....	55
5.3.2.Sedimentlerin Fiziksel İletkenlik Değerleri.....	56
5.3.3.Sedimentlerin pH, Organik Madde Miktarları.....	57
5.3.4.Sedimentlerin Toplam Metal Miktarları.....	59
5.4.Mikro-yapısal Özellikler.....	61
5.4.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDX) Fotoğrafları.....	61
5.4.2.X Işınları Kırınım Analizi (EDX).....	66
<b>6. SEDİMENTLERİN İLAVE MALZEMELER İLE STABİLİZASYONU.</b>	<b>68</b>
6.1.Geoteknik Özellikler.....	69
6.2.Fiziko-kimyasal Özellikler.....	69
6.3.Mikro-yapısal Özellikler.....	71
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>72</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>74</b>

## RESİMLER DİZİNİ

1.1 Nehirden Temizleme Çalışmaları.....	3
1.2 Sedimentlerin Vahşi Depolanma Alanlarına Depolanması.....	3
5.1 Çalca sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	62
5.2 Beşdeğirmen sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	62
5.3 Porsuk Baraj Girişi sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	63
5.4 Porsuk Baraj Çıkışı sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	63
5.5 Vişnelik sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	64
5.6 Resim 5.6. Tabakhane sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	64
5.7 Arıtma tesisi sonrası sedimentlerinin SEM fotoğrafı.....	65
6.1 %100 sediment+%100 uçucu kül, karışımının SEM fotoğrafı.....	71
6.2 %100 Sediment+%100 Kireç karışımının SEM fotoğrafı.....	71

## ŞEKİLLER DİZİNİ

3.1. Sediment Örnekleri alınan istasyonlar ve Porsuk Havzası.....	11
5.1. Sedimentlerin su muhtevası dağılımları.....	49
5.2. Sedimentlerin katı madde ve su içeriği dağılımları.....	49
5.3. Sedimentlerin uçucu madde ve sabit madde dağılımları.....	50
5.4. Sedimentlerin dane çapı dağılımları.....	51
5.5. Sedimentlerin likit limit dağılımları.....	53
5.6. Sedimentlerin plastik limit dağılımları.....	53
5.7. Sedimentlerin plastite kartındaki yeri.....	54
5.8. Sedimentler ile kil mineralleri arasındaki ilişki.....	54
5.9. Sedimentlerin katyon değişim kapasitesi dağılımları.....	56
5.10. Sedimentlerin elektriksel iletkenlik dağılımları.....	57
5.11. Sedimentlerin pH dağılımları.....	58
5.12. Sedimentlerin organik madde dağılımları.....	59
5.13. Sedimentlerin ağır metal dağılımları.....	60
5.14. Çalca sedimentlerinin XRD grafiği.....	66
5.15. Beşdeğirmen sedimentlerinin XRD.....	66
5.16. Porsuk Baraj Çıkışı sedimentlerinin XRD grafiği.....	67
5.17. Vişnelik sedimentlerinin XRD grafiği.....	67

## ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Örnek alınan istasyon noktaları ve bazı özellikleri.....	4
3.1. Kullanılan kirece ait bazı özellikler.....	13
3.2. Portland çimentoları bileşimi (ASTM C150).....	14
3.3. Kullanılan Portland çimentosuna ait bazı özellikler.....	14
3.4. Kullanılan zeolite (klinoptilolit) ait bazı özellikleri.....	16
3.5. Kullanılan sedimanter sepiyolite ait bazı özellikleri.....	17
3.6. Kullanılan uçucu küle ait bazı özellikleri.....	19
5.1. Çalca istasyonundan önce yerelan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	43
5.2. Çalca ile Beşdeğirmen istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	43
5.3. Beşdeğirmen- Porsuk Barajı Girişi istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	44
5.4. Porsuk Barajı Çıkışı-Vişnelik istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	45
5.5. Vişnelik-Tabakhane istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	46
5.6. Şeker Fabrikası ile atıksu arıtma tesisi arasında kalan kirletici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.....	47
5.7. Sedimentlere ait Su Muhtevaları, Toplam Katı Madde ve Toplam Su İçeriği.....	48
5.8. Sedimentlere ait Toplam Uçucu Madde ve Toplam Sabit Madde İçeriği..	48
5.9. Sedimentlere ait Atterberg Kıvam Limitleri, Dane Çapı Dağılımı, Grup Sembolü ve Sınıflandırılması.....	51
5.10. Sedimentlere ait bazı kimyasal analizlerin sonuçları.....	55
5.11. Sedimentlere ait toplam metal miktarları.....	60
6.1. Sedimentlerin iyileştirilmesinde kullanılan karışımlar ve oranları.....	68
6.2. İyileştirilmiş sedimentlerin geoteknik özellikleri.....	69
6.3. İyileştirilmiş sedimentlerin Fiziko kimyasal özellikleri.....	70
6.4. İyileştirilmiş sedimentlerin toplam metal miktarları.....	70

## 1.GİRİŞ

Nehir tabanlarında biriken mineral maddelerin toplamına dip sedimenti denmektedir. Nehirlere doğrudan deşarj edilen kirlenmiş su ve atık maddeler, önce nehir sularını kirletmektedir. Bu kirlilik zamanla dibe çökmekte ve sediment içerisindeki kil danecikleri tarafından adsorbe edilmektedir. Kirlenmiş nehir suları ve sedimentler çevre sağlığı açısından çeşitli tehlikeler içermektedir. Örneğin, balıklar ve kuşlar hastalanarak türleri azalmaktadır. Bu sulardan içen diğer canlılar, av hayvanlar veya balıklar ile beslenen insanlar tehlikelere maruz kalmakta ve uzun süreli kanser riski veya sinir sistemlerin tahrip olmasına yol açmaktadır.

Ayrıca nehir tabanlarında biriken sedimentler nehir yatağının kesit alanını daralttığı için taşkın riskini arttırmaktadır. Bu türlü risk taşıyan nehirlerin dip sedimentleri belirli aralıklarla temizlenmektedir. Bunun için de çeşitli temizleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanı daldırma kepçeler ile yapılan tarama (dredge) yöntemidir. Ancak sedimentlerin yoğunluğu, su muhtevası, dane çapı dağılımı gibi geoteknik ve fiziksel özellikleri farklı olduğundan her bir nehir için optimum temizlenme yöntemi farklı olabilmektedir. Bu nedenle sedimentlerin geoteknik ve fiziksel özellikleri ile temizleme yöntemi arasında sıkı bir ilişki bulunmaktadır. Örneğin su muhtevası yüksek olan akışkan tipli sedimentler dipten basınçla emilmektedir. Daha katı olanları ise tarama yöntemi ile daldırma kepçeler tarafından temizlenmektedir. Ayrıca su muhtevası çok yüksek olan sedimentler, nehir kenarında geo-tüplere konmaktadır. Daha katı olan sedimentler ise konteynerler ile depolama bölgesine sevk edilmektedir.

Nehir tabanlarından temizlenen sedimentler depolama bölgelerine taşınmaktadır. Depolama alanlarında sedimentin konsolidasyon davranışı, hacim değişimi ve şişme miktarı gibi özellikleri de önem kazanmaktadır. Ayrıca depolama sonrası sızıntı suyu kalitesi, ağır metal miktarı, organik bileşen içeriği ve pestisit kirliliği gibi parametreleri de zemin ve yer altı suyu kirliliğine neden olabilmektedir.

Ayrıca, 2003 yılı Türkiye Avrupa Birliği (AB) katılım ortaklığı belgesinde, Türkiye'nin AB çevre mevzuatına uyum sağlanması istenmektedir. Bu kapsamda

Ülkemiz açısından gereken verilerin toplanıp değerlendirilmesi ile çevrenin korunmasının sağlanması kısa ve orta vadeli hedefler arasında yer almaktadır. Avrupa Parlamentosu konsey direktiflerine göre çevrenin korunması, su kirliliği kalitesinin sağlanması, yeraltı suyu kirliliğinin önlenmesi, balık yaşamının ve yabani kuşların korunması bir zorunluluk durumundadır. Bu hedefleri gerçekleştirmek ve bölgede sürdürülebilir evre yönetimine ve yaşam kalitesine katkıda bulunabilmek için mevcut durumu ortaya çıkaracak bilginin elde edilmesi ve değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu alışmayla Porsuk dip sedimentlerinin 2004 Yılı Yaz mevsimindeki mevcut durumu ortaya çıkarılacak ve anılan hedeflere hizmet edebilecektir.

### 1.1.Problemin Tanımı

Porsuk Nehri Kütahya şehrinin güneyinde bulunan 2312 m yüksekliğindeki Murat Dağının kuzey doğusundan doğar. Porsuk Nehrinin suları Kütahya, Eskişehir, Ankara (Polatlı) zerinden Sakarya nehrine ulaşır ve Karadeniz'e dökülür. Porsuk Nehri ortalama 8,1 m<sup>3</sup>/sn değerinde bir debiye sahiptir.

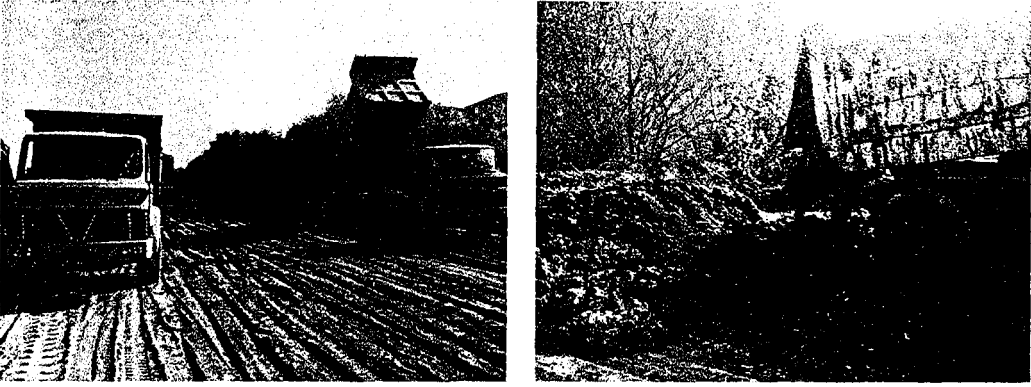
Porsuk havzası üzerinde çökeltme haznesi inşaatları ve erozyonu azaltıcı önlemler yok denecek kadar azdır. Bu nedenle Porsuk Nehri sediment yükünün 350 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yıl civarında olduğu tahmin edilmektedir. Yani nehirde yıllık taşınan sediment miktarı 4 milyon ton civarındadır. Bazı yerlerde biriken sedimentin derinliği yaklaşık olarak bir ile üç metre arasında değişebilmektedir. Birikme akarsu yatağında tıkanmalara neden olmakta ve taşkılara yol açmaktadır. Porsuk Nehrinde en son taşkın 26.12.2001 yılında meydana gelmiş ve bazı yerleşim alanları sular altında kalmıştır. Nehir yatağında biriken sediment üç ile beş yıl arasında değişen sıklıkta Devlet Su İşleri tarafından daldırma kepçeler ile temizlenmektedir. Bu temizlenen sediment vahşi depolama sahalarına taşınmaktadır (Resim 1.1 ve Resim 1.2).

Porsuk Nehri Kütahya termik santrali, azot fabrikası, mezbaha, Eskişehir Ford otomotiv ve TUSAş uçak sanayi, şeker fabrikası, hava ikmal bakım merkezi ve küçük ölçekli sanayi kolları tarafından kirletilmektedir. Ayrıca bütün yerleşim alanlarında kanalizasyon atıkları, mezbaha atıkları, tarımsal sulamadan dönen atık

sular nehre deşarj edilerek kirliliğe neden olmaktadır.



Resim 1.1. Nehirden temizleme alışmaları



Resim 1.2. Sedimentlerin vahşi depolama alanlarına depolanması

Porsuk Nehri, Kütahya, Eskişehir ve Ankara İl sınırlarında yer almaktadır ve çevresinde 1 milyondan fazla insan yaşamaktadır. Bu nedenle Porsuk Nehri kirliliğinin geniş bir kapsamda incelenmesi, riskli bölgelerin belirlenmesi, mevcut durumunu güncel veriler ışığında ortaya konulması önemli bir durum haline gelmiştir. Bu tez ile Porsuk Nehrine ait veriler ortaya konulacaktır. Kirlenmiş bölgeler belirlenerek gerekli temizleme, iyileştirme veya diğer çalışmalar için gerek duyulan ön bilgi sağlanacaktır.

## 1.2.Çalışmanın Kapsamı

Porsuk nehri 436 km uzunluğundadır ve tamamına yakın kısmı kirlidir.

Ancak kirlenmenin çok yoğun olduğu Kütahya'nın çıkışından Eskişehir'in çıkışına kadar olan bölgede 8 noktadan sediment örnekleri alınmıştır. Örnek alınan noktalar Tablo 1.1'de verilmiştir. Bu sediment örnekleri nehrin tabanından uzatılabilen bir numune alıcı yardımıyla (0–40 cm arasında değişen derinliklerden) alınmıştır.

Sediment örnekleri üzerinde birim hacim ağırlığı, su muhtevası, dane özgül ağırlığı, dane çapı dağılımı, zemin sınıfı, likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Sedimentlerin fiziko–kimyasal özelliklerini belirlemek için ağır metal miktarı, katyon değişim kapasitesi ve organik madde miktarları belirlenmiştir. Ayrıca sedimentlerin mikro yapısal özelliklerinin belirlenebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) ve X–ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır. Bu deneyler ile sedimentlerin geoteknik, fiziko–kimyasal ve mikro yapısal özellikleri ortaya çıkarılmıştır.

İyileştirme çalışmasında ise kirlenmiş sedimentlerde kirlilik sınır değerlerinin ilave maddeler ile sağlanıp sağlanmayacağı incelenmiştir. İyileştirme için Çalca istasyonundan alınmış sediment seçilmiştir. Bu sediment kireç, çimento, zeolit, sepiyolit, uçucu kül gibi ilave malzemelerle iyileştirilmiştir. Bunun için değişik oranlarda sediment ve ilave malzeme karışımları hazırlanmış ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 1.1. Örnek alınan istasyon noktaları ve bazı özellikleri (DSİ, 1987).

İstasyon Numarası ve Bölge Tanımlaması	Porsuk Kaynağına Olan Uzaklık (km)	Denizden Yükseklik (m)
1- Çalca	155	914
2- Beşdeğirmen	165	904
3- Porsuk Baraj Girişi- Sabuncupınar	175	890
4- Porsuk Barajı Çıkışı	180	896
5- Vişnelik	230	794
6-Tabakhane	242	792
7- Eskişehir Şeker Fabrikası Sonrası	245	785
8- Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisi Sonrası	255	778

## 2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda kirlenmiş nehir sedimentlerinin geoteknik ve kimyasal özellikleri üzerine bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Bu çalışmalar genelde nehirlerin mevcut durumun belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Kirlenmiş nehir ve sedimentlerin çevre sağlığı açısından olumsuz etkileri fazla olduğundan ağır metal, PAH, pestisit gibi kirlilikleri çok önemli parametreler olmaktadır. Genelde sedimentlerin yoğunluk, mukavemet ve permeabilite özellikleri düşük, su muhtevası, boşluk oranı ve sıkışabilirliği yüksektir. Sedimentler bünyesinde birçok organik ve inorganik bileşenleri tehlikeli miktarda ağır metal, pestisit ve PAH mineralleri bulundurmaktadır (Pagnanelli et al., 2004). Ayrıca sedimentler ile su canlıları arasında etkileşim mekanizmaları konusunda da çalışmalar yapılmaktadır (Winters, 2000). Sedimentlerin mekanik davranışı üzerine organik karbon, silt ve kil minerallerinin miktarı veya tipleri etki edebilmektedir.

Lechler ve arkadaşları (2000), Amazon Nehrinin Brezilya topraklarında kalan bölümünde araştırma çalışmaları yürütmüşlerdir. Çalışma Madeira Nehri havzasında yapılmıştır. Söz konusu havzada nehir suyunda ve sedimentlerinde bulunan cıva miktarının yüksek olduğu görülmüştür. Cıva miktarı diğer nehirler ile karşılaştırılmış ve çok yüksek olarak bulunmuştur. Cıva miktarının yüksek olmasının nedeni havzada yıllardır yürütülen madencilik faaliyetleri olduğu belirlenmiştir. Madenlerin çevresinde cıva miktarının diğer bölgelere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

İspanya'nın Trancoo nehrinde yürütülen başka bir çalışmada, sediment kirliliğinin çevreye ve insan sağlığına zararlı boyutlarda olduğu belirlenmiştir. Nehir yatağından ve taşkın bölgelerinden kış ve yaz döneminde örnekler alınmıştır. Sedimentlerde EDX ve XRD yöntemleri ile kimyasal bileşimleri ve minerolojisi incelenmiştir. Sedimentlerin taşkın bölgelerinde kum ve çakıl ağırlıklı olduğu, kirliliğin ise diğer örneklere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Taşkın bölgeleri dışında kalan istasyonlardan alınmış olan örneklerde ise sedimentlerde kirliliğin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. (Araujo ve ark., 1998)

Çin Devletinin sanayisi ağırlıklı olarak güneydoğu ve güney Çin'de yoğunlaşmaktadır. Güneydoğu Çin'de bulunan Minjiang Nehri sedimentleri ve suyunda yapılmış olan bir araştırmada yüksek miktarda PCB ve diğer zehirli maddelere rastlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sanayi bölgelerinde kirliliğin daha yüksek olduğu ve bu bölgelerden uzaklaştıkça kirliliğin düşmekte olduğunu göstermiştir. Kirliliğin belirli bölgelerde yoğunlaşmasının temelinde sedimentlerin geoteknik ve kimyasal özelliklerinin önemli bir payı olduğu sonucuna varılmıştır. (Zhang ve ark., 2003)

Nil nehri üzerinde Asvan Barajı ile Sohag arasında kalan bölgede sediment ve nehir suyundan alınan örnekler üzerinde kirlilik araştırmaları yürütülmüştür. Çalışmada Diğer Afrika nehirleri ile karşılaştırıldığında, Nil Nehrinin hem sediment hem de su kirliliği açısından daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ca, K, Sr, Zn, Cu, V ve Mn suda çözünerek süspansiyon olarak nehirden taşındığı ortaya konulmuştur. Kirletici maddelerin dağılımında doğal süreçlerin etkin olduğu belirlenmiştir. Sedimentler üzerinde XRF, EDX, ve HCl çözeltileri ile ağır metal deneyleri yapılmıştır. Pb, V, U, As ve Ni gibi kentsel ve endüstriyel atık kaynaklı kirleticilerin ise yerleşim ve sanayi bölgeleri civarında daha yoğun olduğu bulunmuştur (Dekov ve ark., 1997).

Kazakistan'da bulunan Nura nehri üzerinde yürütülen bir araştırma çalışmasında sedimentlerde bulunan cıva miktarı incelenmiştir. Sedimentlerdeki kirliliğin kaynağı olarak bölgede faaliyetlerine devam eden kimyasal madde üreten fabrika olduğu tespit edilmiştir. Fabrika atıklarının kül ve cıva açısından zengin olduğu gözlenmiştir. Akarsu yatağındaki sedimentlerin de kül ve cıva içerdiği deneysel olarak bulunmuştur. Sedimentlerdeki kirliliğin akış yönünde azaldığı ancak fabrika civarında ise en yüksek değerlere sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır (Heaven ve ark., 2000).

Ob-Irtysh nehirleri'nden alınan örnekler üzerinde yapılan incelemelerde benzer uzunlukta ve havza alanı olarak da yaklaşık olarak aynı büyüklüğe sahip nehirler ile karşılaştırma yapıldığında, Cd, Cr, Cu, Ni ve Pb değerlerinin yüksek olduğu bulunmuştur. Kutup bölgesinde kalan bölgelerdeki ağır metal miktarı düşük olarak bulunmuştur. Ancak sanayi tesislerinin ve yerleşim alanlarının yoğun olarak

bulunduğu havzanın güney bölümünde ise ağır metal miktarları yüksek olarak belirlenmiştir (Moran ve Woods, 1997).

Ren ve Mus nehirleri üzerinde sedimentlerin biyolojik ve kimyasal yöntemlerle iyileştirilmesi için iki proje çalışması gerçekleştirilmiştir. Seçilen bölgeler yönetmeliklere göre çok kirli yani 4 derece olarak tanımlanmış bölgelerdir (0 temiz, 4 çok kirli). Çalışmalarda, seçilen alanlarda sediment tabakasının üst bölümü kazılarak temizlenmiş ve yerine kumlu zemin serilmiştir. Bu alanlarda daha sonra yürütülen incelemelerde canlı yaşamı ile sedimentler üzerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler gözlenmiştir. Proje iki yıl sürmüş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre canlı yaşamı ilk altı ayda hızla gelişirken izleyen sürede gelişimi yavaş olmuştur. Sedimentler üzerinde yürütülen kirlilik ölçümlerinde ise ilk yıl sonunda kirliliğin büyük oranda düştüğünü gözlenmiştir. İyileştirme çalışmalarından sonra kirlilik değeri çevre yönetmeliklerinde öngörülen sınır değerlerden aşağıya çekilmiştir (Besten ve ark., 2000).

Lübnan'daki Nahr-İbrahim Nehri'nde yürütülen bir başka çalışmada nehir yatağının kireçtaşı tabakası üzerinde olduğu, böyle bir nehrin gerek su gerek sediment kirliliği açısından daha fazla kirliliği adsorbe edebildiği gözlenmiştir. Nehir yatağının yapısı nedeni ile nehrin pH değerinin yüksek olduğu ve suyun alkali özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Yapılan sediment ve su incelemelerinde kirliliğin sediment ve su arasında paylaşıldığı gözlenmiştir. Nehir ile taşınan Fe, Zn, Pb ve Cd metallerinin sedimentlerdeki değerleri ölçülmüştür. Sedimentlerin kireç taşı üzerinde birikmesi durumunda sedimentlerin kirleticileri adsorbe ettikleri ve nehir suyunda ise daha az metal iyonları tespit edilmiştir. Yapılan incelemelerde kireç taşının yüzeye yakın olduğu bölgelerdeki nehir kirliliği değerleri daha az miktarda bulunmuştur (Korfali ve ark., 2003).

Hong Kong'da gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise kentsel katı atıklar, kanalizasyon ve sedimentlerin, çevrim (recirculation) teknolojisi kullanılarak iyileştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmada çevrim teknolojisi kullanılması durumunda atık maddelerde ön kirleticilerin, (metaller, PAH vb.) daha düşük miktarlarda bulunduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca yürütülen çalışmada çevrim teknolojisi kullanılarak biogaz elde edilmiştir. Sonuçlar atıkların ve sedimentlerin

bu yöntem ile iyileştirilmesi ile depolama alanlarına duyulan gereksinimin azalacağını göstermiştir (Chan ve ark.; 2001). Ayrıca Boot (1986), Santa Barbara Körfezindeki deniz sedimentlerinin geoteknik özelliklerini ve likit ve plastik limit ile organik madde arasındaki ilişkileri belirlenmiştir. Özaydın ve Orhon (1981), İstanbul Haliç tabanında biriken dıpsel çamurların konsolidasyon özelliklerini incelemiştirler. Nehir sedimentlerinin geoteknik karakteristiklerini belirlemişler ve sedimentlerin killi silt olduğunu ve yüksek plastik ve likit limite sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Sedimentlerde gözlenen kirliliklerin önlenmesi için iyileştirme birçok yöntem geliştirilmiştir. Yöntemlerde kirleticilerle sedimentlerin etkileşimin sınırlandırmak veya kirleticilerin yayılması önlemek amaçlanmaktadır. Martin ve ark., (1990) asidik hidrokarbonlu bir yapıya sahip olan arıtma çamurlarını çimento, kireç, uçucu kül gibi pozolanik esaslı ilave maddeler ile iyileştirmiştir. Çamurun pH değinde artış gözlenmiş ve geçirimsizlik azalmıştır. Serbest basınç dayanımı da artmıştır. İlave maddeler ile pozolanik reaksiyonlar solidifikasyon gerçekleşmiştir .

Sedimentlerin depolanmasında karşılaşılan bir başka sorunda, sızıntı sularının yeraltı suyuna ve zemine karışmasıdır. Hidrokarbonlu atıklar ile yürütülen arazi deneyleri sonucunda, üç farklı karışım kullanılmıştır. İlk karışımında atık-kil- uçucu kül- kireç (1-1-0.75-0.2), ikinci karışımında atık- uçucu kül- kireç (1-0.3-0.1) ve üçüncü karışımında ise atık- uçucu kül- kireç- çimento (1-0.3-0.05-0.05) kullanılmıştır. İyileştirme sürecinin sonucunda atıklar depolama alanlarına yerleştirilmiş ve sızıntı ile gerçekleşen kirliliğin en az düzeyde gerçekleştiği görülmüştür (Van-Keuren ve Martin, 1987).

Pozolanik tepkimelerin iyileştirme üzerindeki etkisini inceleyen Jones (1989) atık içeriği üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir. Katılaştıran atıkların dayanım ve geçirimsizlik gibi özelliklerinin uzun dönemli performansı için pozolanik tepkimelerin özelliklerinin anlaşılması gerektiğini ileri sürmüştür.

Düzenli depolama alanlarının tasarımında yüzey sularının depo sahalarından uzaklaştırılması için eğimli olarak yapılmalarının uygun olduğunu belirlenmiştir. Eğimin %6-12 arasında seçilmesinin yağış sularının uzaklaştırılması için uygun olduğunu, ayrıca üzerinde bitki yetiştirilmesi için de derinliğinin 0.6 m

olması gerektiği ileri sürülmüştür. Geçirimsizliğin sağlanması için de kil, çimento ve kireç kullanılması önerilmiştir. Yeraltı suyunun depolama sahasına sızmasının önlenmesi içinde bentonit koruyucu duvar kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir (Tolman ve ark., 1978).

Porsuk Nehri sedimentleri üzerinde yürütülen bir çalışmada nehir sedimentleri üzerinde ağırlıkça %5 ilave malzeme olarak zeolit, kireç ve çimento kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Deney sonuçlarından zeolit ve kireç kullanılan örneklerde ağır metal kirliliğinin azaldığı gözlenmiştir. Sedimentlerin sıkışabilirliğinde ise azalma olmuştur. (Koyuncu ve Güney, 2003)

Porsuk Nehri dip sedimentleri üzerinde yürütülen bir başka çalışmada ise sedimentlerin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bulgular, sedimentlerin yüksek plastisiteye sahip olduklarını, kum ve kil miktarının silt miktarına göre az olduğunu göstermiştir. Deneyler ise sedimentlerin yüksek sıkışabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir (Koyuncu ve Yücel, 2003).

Ağır metaller ile kirlenmiş olan zeminlerin kazılarak iyileştirilmesinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ayrıca fiziko-kimyasal özelliklerin bilinmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği de açıktır. İyileştirme yöntemlerinde sadece kimyasal özellikler değil, aynı zamanda mikroorganizmalar, bitkiler, yeraltı suyu ve iklim özelliklerinin de etkili olduğu belirtilmiştir (Assink ve ark., 1988).

Bir başka çalışmada ise, inorganik madde içeren atıklarla kirlenmiş olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimento, uçucu kül, fırın cürufu ile kireç kullanılmış ve yapılan deneylerde iyileştirilmiş olan atıkların sızıntı suyundaki krom, kadminyum, arsenik, kurşun ve diğer metal miktarlarını azalttığı gözlenmiştir (Akhter ve ark., 1990).

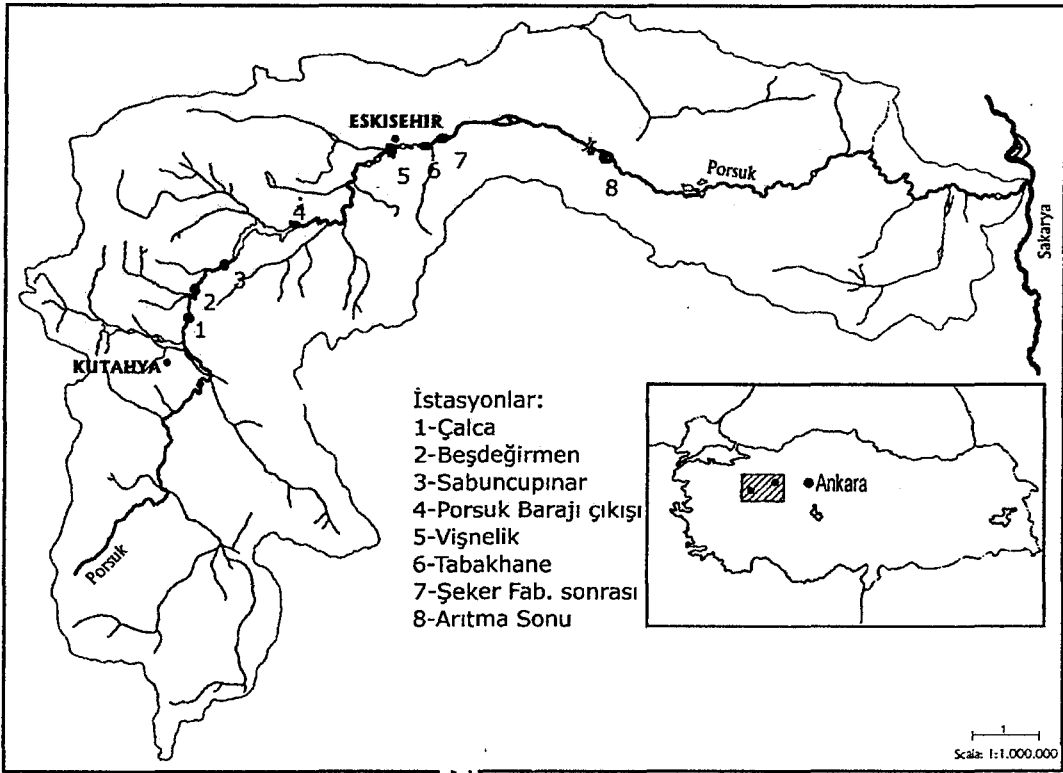
Metaller ile kirlenmiş zeminlerin iyileştirilmesi için Kleppe ve ark.(1992), yürüttükleri çalışmalarda kireç ve portland çimentosu kullanmışlardır. Deneysel çalışma iki ayrı bölgede yürütülmüştür. Sonuçlarda metal miktarlarında değişimler, organik kirleticilerin ve hidrokarbonların dayanımı azalttığını, sızıntı deneylerinde ise zemin çimento karışımlarının sızıntı suyunun bazı metaller içerdiğini gözlemlemişlerdir.

Benzer bir çalışmada Porsuk Nehri sediment atık çamurunun stabilizasyon/solidifikasyon yöntemi ile iyileştirilmesi için bir model deney yapılmıştır. Stabilizasyon işlemi için kireç, imento ve zeolit gibi inorganik esaslı ilave malzemeler bir kutuya konularak oturması beklenmiştir. Bu malzemelerden sırasıyla, %5,10,20 ve30 oranlarından kullanılmıştır. Stabilizasyon ncesi ve sonrası numunelerin geoteknik, fiziko-kimyasal ve mikro-yapısal özellikleri belirlenmiştir (Apaydın, 2003).

### 3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Porsuk Nehri Dip Sedimentleri

Porsuk Nehri, 436 kilometre uzunluğundadır ve 11326 km<sup>2</sup> lik bir havzaya sahiptir. Porsuk Nehri uzunluğu boyunca kritik noktalardan Şekil 3.1'de gösterilen toplam 8 istasyon seçilmiştir. Bu noktaların seçiminde kirlenmenin başladığı Kütahya şehri ile Eskişehir arasında kalan bölge seçilmiştir. Bu istasyonlar ve Porsuk Nehrinin doğduğu kaynaktan olan uzaklıkları Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Bu istasyonların seçiminde Devlet Su İşleri Kalite Gözlem İstasyonlarının bulunduğu noktalar, potansiyel kirlenme kaynaklarının nehre karıştığı noktalar, nüfusu yoğun yerleşim bölgeleri veya önemli kaynakların deşarj noktaları göz önünde tutulmuştur.



Şekil 3.1. Sediment örnekleri alınan istasyonlar ve Porsuk havzası (DSİ, 1980)

### 3.2. Kireç

Kireç kalsiyum oksit (CaO) olarak adlandırılır. Kalker veya kireç taşının 980–1000 °C pişirilmesi ile elde edilir. Kirecin hammaddesi olan kalkerin bileşiminde %90'dan fazla kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) bulunmaktadır. Kalker doğal halde bünyesinde aragonit minerali de barındırmaktadır. Doğal haldeki birim hacim ağırlığı 2.5–2.7 gr/cm<sup>3</sup> aralığında değişir. (Kamon ve ark., 1991).

Sedimentlerin ve zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmasının nedeni kireç, sıvı ve zemin arasında gerçekleşen kimyasal tepkimelerdir. Bu kimyasal tepkimelerden birisi katyon değişimi ve flokülasyon–agloremasyon tepkimesidir. Bu tepkimelerde kirecin Ca<sup>+2</sup> iyonları, kil üzerinde yer alan sodyum, hidrojen ve magnezyum gibi iyonlar ile yer değiştirir. Bu yer değiştirmenin sonucunda kil daneleri yüzey üç etkileşimi ile birbirlerini çekerler. Bunun nedeni ise kalsiyum iyonlarının kil yüzeyinde yer almasıdır. Kil daneleri yüzeyinde farklı iyonlar yer alsa da kalsiyum baskın durumdadır. Bu durumda kil danelerinin yüzey yüklerinin değiştiği gözlenmektedir. Kalsiyum iyonları tek değerlikli iyonların yerini aldığından kil yüzeyinin elektriksel yükü değişmektedir. Kalsiyum iyonları yüzeyde yer aldığı anda kil danelerini bir birine yaklaştırmaktadır. Bu tepkimenin gerçekleşmesi ile kilin plastisitesi düşmektedir. Killi zeminlerde kireç ile yapılan iyileştirme sonucunda zeminin gevşediği ve siltli bir yapıya dönüştüğü ve zeminin dane çapının arttığı gözlenebilir. Bunun nedeni kil danelerinin kirecin etkisi ile topaklaşmaya başlamasıdır. Böylece likit limit azalır ve zemin daha az plastik hale gelir.

Kirecin zemin ile etkileşimi sonucunda gerçekleşen bir diğer tepkime ise pozolanik, yani çimentolaşma tepkimesidir. Bu tepkimede zemin içinde yer alan alüminyum ve silisyum kökenli mineraller kirecin bünyesinde yer alan kalsiyum ile tepkimeye girmektedir. Bu tepkimenin sonucunda kalsiyum silikatlar ve/veya kalsiyum aluminatlar oluşmaktadır. Kalsiyum silikatlar zaman içerisinde katılaştıran ve suda erimeyen bileşiklerdir. Bu bileşiklerin su ile etkileşiminde ise kalsiyum silika hidratlar oluşmaktadır. Benzer olarak da kalsiyum alumina silikatlar da kalsiyum alimuna hidratlara dönüşmektedir. Bu hidratasyon tepkimeleri çimentonun

hidratasyonu ile benzerlik göstermektedir (Koyuncu, 1998; Tuncan ve Ark, 1996).

İyileştirme çalışmalarında S-KK-80-T ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) isimli torbalanmış ticari kireç kullanılmıştır. Kireç kullanılmadan önce etüvde kurutulmuştur. Kirece ait olan bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan kirece ait bazı özellikler

Katkı Maddeleri	pH	Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	Dane Özgül Dane Çapı Ağırlığı	Dağılımı (%)		
				Kum	Silt	Kil
Kireç	11.24	1.64	2.20	2	79	19

### 3.3. Portland Çimentosu

Çimento, havada ve suda sertleşen ve sertleştikten sonra da suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı bir maddedir. Çimentonun özgül yüzey alanı 2800-4000  $\text{cm}^2/\text{gr}$  arasında değişmektedir. Yüzey alanı arttığında su ile temas eden yüzey artar, sertleşme hızlı ve daha iyi oluşur. Özgül ağırlıkları 3.10-3.16  $\text{g}/\text{cm}^3$  arasındadır. Çimento içerisine katılan alçıtaşı çimentonun sertleşme hızını kontrol ederek katılaşmasını (prizini) geciktirir. Klinkere alçıtaşı katıldığında kalsiyum alüminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) bileşeni, alçı ile reaksiyona girerek kalsiyum sülf alüminatlar (C-S-A) oluşur. Bu kalsiyum sülf alüminatlar ise kalsiyum alüminat ( $\text{C}_3\text{A}$ )’ların reaksiyon hızını yavaşlatır. Portland çimentolar bugün uluslararası kabul gören tiplere ayrılmıştır. Bu tipler ve sınır değerleri ASTM C150 standartlarına göre Çizelge 3.2’de verilmiştir.

İyileştirme çalışmalarında Standart Tip :I sınıfı Eskişehir çimento fabrikası portland çimentosu kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılması amacı ile çimento kullanılmıştır. Çimento kullanılmadan önce etüvde kurutulmuştur. Kullanılan portland çimentosunun bazı özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Portland çimentoları bileşimi (ASTM C150).

Kimyasal Bileşikler (%)	Tip:I	Tip:II	Tip:III	Tip:VI	Tip:V
CaO	64	63	65	60.5	60
SiO <sub>2</sub>	21	22	20	24	26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.5	5	5.5	5	2.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	4	3	4.5	1.5
MgO	2.5	3	2.3	3	2.5
SO <sub>3</sub>	2.1	1.5	2.5	1.7	2
Çözünemeyen Madde	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Priz Bitiş	6 dk.	6 dk.	6 dk.	6 dk.	6 dk.
Sertleşmenin Bitmesi	10 sa.	10 sa.	10 sa.	10 sa.	10 sa.

Çizelge 3.3. Kullanılan Portland çimentosuna ait bazı özellikler

Katkı Maddeleri	pH	Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	Dane Özgül Ağırlığı	Dane Çapı Dağılımı (%)		
				Kum	Silt	Kil
Çimento	10.38	2.73	2.81	3	59	38

### 3.4. Zeolit

Zeolitler alkali ve toprak alkali metallerin kristal yapıya sahip sulu alümina silikatları olup çerçeve silikatlar grubundadır. Mineral türü olarak 1750'lerden bu yana bilinmekle beraber kristal yapıları, x-ışınları kırınımı, I.R. absorpsiyonu, nükleer manyetik rezonans, elektron spin rezonans gibi yöntemlerin geliştirilmesi sayesinde ancak 1930'larda çözümlenebilmiştir. İskelet yapılarındaki Si/Al oranlarındaki ve içerdikleri katyon cinsi ve miktarlarındaki bazı farklılıklara rağmen;  $(M^+, M^{+2})O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot nH_2O$  genel formülü ile ifade edilebilirler. Burada  $M^-$  bir alkali katyon olup genellikle  $Na^+$  veya  $K^+$ , nadiren de  $Li^+$  olur.  $M^{-2}$  ise bir toprak alkali katyondur ve genellikle  $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  nadiren de  $Ba^{+2}$ ,  $Sr^{-2}$  olur.

Herhangi bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi  $SiO_4$  veya  $AlO_4$  tetraederleridir. Si ve Al tetraederlerinin oluşturduğu birincil yapı ünitelerinin birleşmesi ile tek ve çift halkalı ikincil yapı üniteleri ve yüksek simetrik parametreler meydana gelir. Bu polieder ve ikincil yapı ünitelerinin üç boyutta değişik şekillerde dizilmesi ile de mikro gözeneklere sahip zeolit iskeleti ortaya

çıkarm. Poliederler ve bunları birbirine bağlayan ikincil yapı üniteleri arasında yer alan bu mikro gözenekler mikro pencerelerle birleşip bir, iki veya üç boyutlu boşluk sistemleri ve/veya kanalları oluşturur. Boşluk miktarı toplam hacmin %20'si ile % 50'si arasındadır. Zeolit minerallerinin en önemli özelliği; bu boşluklar ve bu boşluklara kolayca girebilen ve yer değiştirebilen sıvı ve gaz molekülleri ile toprak alkali iyonlardan ileri gelen "moleküler elek" olmalıdır.

Zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanılabildiği 1940'lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak volkanik kayaların boşluk ve çatlaklarında bulunduğunun bilinmesi kullanımlarını sınırlamıştır. Ancak 1950'li yıllardan sonra denizel ve gölssel tüflerin de zeolit içerdiklerinin saptanmasıyla, doğal zeolitlerin kullanım alanları hızla genişlemiştir. Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan; iyon değişikliği yapabilme adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, ayrıca tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarına neden olmuştur. Son yıllarda önemli bir endüstriyel hammadde durumuna gelen doğal zeolitlerin bu özelliklerinden biri veya birinden fazlasının istediği kullanım alanları: kirlilik kontrolü, enerji, tarım-hayvancılık, maden-metallurji ve diğer alanlar olmak üzere 5 ana bölümde toplanabilir (DPT, 1996).

Bu çalışmada, Balıkesir, Gördes yöresi doğal zeoliti (klinoptilolit) kullanılmıştır. Bu zeolit  $(Na_4K_4)(Al_8Si_{40}O_{96})24H_2O$  formülüne sahip klinoptilolitçe zengin zeolitik bir tüftür (Breck,1974). Zeolitler, kimyasal elek, gaz absorplayıcı, yem katkı maddesi, koku kontrol malzemesi ve su filtresi olarak içme ve akvaryum sularında kullanılmaktadır. Klinoptilolit, büyük gözenek hacmi, yüksek absorplama özelliği, uçtaki sıcaklıklara dayanıklılığı, kimyasal olarak nötr yapısı nedeni ile sediment iyileştirmesi için seçilmiştir. Zeolit 74 mikron (200 nolu elek çapında) öğütülmüş ve etüvde kurutulduktan sonra kullanılmış ve bazı özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan zeolite (klinoptilolit) ait bazı özellikleri

Katki Maddeleri	pH	Elektriksel	Dane	Özgül	Dane Çapı		
		İletkenlik	Ağırlığı		Dağılımı (%)		
		(mS/cm)			Kum	Silt	Kil
Zeolit	7.83	0.86	2.14		0	76	24

### 3.5. Sepiyolit

Sepiyolitin zincir yapısına sahip minerallerin kristal strüktürlerinde üç tür aktif absorpsiyon merkezi mevcuttur. Bunlar; (1) tetrahedral tabakalardaki oksijen iyonları, (2) yapısal zincirlerin kenarlarındaki magnezyum iyonlarına koordine olmuş su molekülleri, (3) lif eksenleri boyunca uzanan SiOH gruplarıdır. Sepiyolitte ortalama mikropor çapı 15 Å, mezoporların yarıçapı ise 15 ile 45 Å arasındadır. Teorik olarak sepiyolit için 400 m<sup>2</sup>/g dış yüzey ve 500 m<sup>2</sup>/g iç yüzey alanı saptanmıştır. Sepiyolitin yukarıda özetlenen özgül yüzey alanı ve buna bağlı yüksek absorpsiyon özelliğinden dolayı başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Koku giderici olarak çiftlik ve ahırlarda; evcil hayvanlar ve ahır hayvanlarının
- atıklarının emilmesi ve koku giderilmesi için zeminlerde (pet-litter),
- Tarım ve böcek ilaçları taşıyıcısı olarak,
- Madeni esaslı yağlar, nebati yağlar ve parafinlerin rafinasyonunda,
- Atık su arıtma sistemlerinde,
- Karbonsuz kopya kağıtları ve sigara filtrelerinde,
- Gastrointestinal sistemle ilgili ilaçlarda toksin ve bakteri emici formülasyonlarda,
- Deterjan ve temizlik maddelerinde.

Türkiye sedimanter sepiyolit zengini bir ülkedir. Dünya sepiyolit rezervlerinin %70'i Türkiye'de bulunmaktadır. Sepiyolitler doğada saf halde

bulunabilir ve 700 m<sup>2</sup>/g gibi yüzey alanına sahiptir. Bej, beyaz ve kahverengi renklerde bulunabilir. Sepiyolit Magnezyum hidro silikattan ibaret bir kil mineralidir, lifli bir yapısı vardır ve yarım birim hücre için ideal formülü  $Mg_8 \cdot Si_{12} \cdot O_{30} \cdot (OH)_4 \cdot (OH_2)_4 \cdot 8H_2O$  şeklindedir. Üstün mekanik ve termomekanik özelliklerinden dolayı teknolojik malzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı son yıllarda yüksek performans gerektiren uygulamalar için aranan bir malzeme durumuna gelmiştir. Türk sepiyoliti üzerine çok ayrıntılı araştırmalar yürütülmüş ve halen de yürütülmekte olup yeni bulunan uygulama alanları arasında katalitik ekzost filtreleri, çeşitli özel kağıtlar, biyoreaktörler vb. sayılabilir. Ocakta üretilen kahverengi sepiyolit % 40 civarında rutubet içerikli olup güneşte kurutma ile bu rakam % 22'ye düşürülmektedir. Ayrıca % 3 civarında organik madde içeren sepiyolit, jel yapıcı, sondaj çamuru maddesi ve gübre katkısı olarak da kullanılmaktadır (DPT, 1996).

Bu çalışmada kullanılan doğal sepiyolit Sivrihisar sepiyolitidir. Bu sedimanter tip sepiyolit beyaz renklidir. Eskişehir-Sivrihisar güneyi Yukarı Sakarya Neojen alanında Pliyosen çökellerinin evaporitik dönemlerine ait birimleri içerisinde, çok değişik boyutlarda mercerler şeklinde bulunur. Sepiyolit 74 mikron (200 nolu elek çapında) öğütülmüş ve etüvde kurutulduktan sonra kullanılmış ve bazı özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan sedimanter sepiyolite ait bazı özellikleri

Katkı Maddeleri	pH	Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	Dane Ağırlığı	Özgül Dane Çapı Dağılımı (%)		
				Kum	Silt	Kil
Sepiyolit	8.26	0.36	1.87	0	73	27

### 3.6. Uçucu Kül

Kül genel olarak ince danelerden, silika SiO<sub>2</sub>, alüminyum Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ferrik oksit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve birçok diğer oksitler ve alkalilerden oluşmuştur. Uçucu kül (fly ash), termik santrallerde kömürün yanmasından sonra baca filtrelerinde elektrostatik ayırıcılarla havadan süzülerek toplanan küllere denir. Portland çimentosundan daha

inedir, spesifik yüzey alanları  $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$  civarında olup, genel olarak  $1000-4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  arasındadır. Uçucu küllerin özgül ağırlıkları yaklaşık  $1.90-2.4 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir. Birim ağırlığı gevşek durumda  $0.55 \text{ g/cm}^3$ , sıkışık durumda  $0,85 \text{ g/cm}^3$  mertebesinde. Dane boyutları ise  $0.5-200$  mikron arasındadır. Dip külü (bottom ash), kömürün yanması sonucu oluşan bir atıktır. Fırın tabanından toplanır. Kompozisyonu santrallere ve üzerinde bulunan kaynatıcının değişkenliğine bağlıdır. Bileşimleri ise yaklaşık olarak fly ash ile benzerdir ve bir miktar uçucu kül içerirler. Taş kömürünün yakılması ile elde edilen dip külleri, ağırlıklı olarak  $\text{SiO}_2$ , ve bir miktar  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bulunur, ancak  $\text{CaO}$  miktarı çok düşüktür. Bu küller, silikoalüminoz adını alır. Linyit kömürünün atığı olan uçucu küller ise bileşimlerine göre silikokalsik ya da sülfokalsik tipinde olabilirler. Birinci grupta  $\text{SiO}_2$  miktarı, ikinci sülfokalsik grubuna göre daha fazladır ve her iki grupta da önemli miktarda  $\text{CaO}$  bulunur. Ayrıca sülfokalsikler,  $\text{SO}_3$  de içerirler.

Uçucu kül ve dip külü, kısaca küller, pozolan malzemeler veya endüstriyel bir ürün olduğundan, yapay pozolan malzemeler olarak da adlandırılır. Küllerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri çok azdır. Bünyesinde silisli ve alüminosilisli mineraller bulunduran kireç, çimento ve su ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan bütün malzemelere genel bir isim verilerek Puzolan malzeme denilmektedir. Küller de pozolanik bir karaktere sahiptir. Böylece pozolanik reaksiyon yapar ve çimentolaşmış yeni bir ürün elde edilir. Yüksek spesifik yüzey alanına ve poroziteye sahip olduklarından atıklardaki sıvıları ve organik bileşiklerini azaltırlar. Ayrıca yüksek  $\text{SiO}_2$  içeren killi toprak ve şeyl'lerin  $430 \text{ C}$  ile  $1100 \text{ C}$  pişirilmesi (kalsinasyonu) ile oluşan tuğlalar da uçucu kül özelliğinde olmaktadır. Bundan başka yanmış petrol tabakaları ve bazı cürufurflar da yapay puzolan olarak kullanılırlar.

Türkiye'de milyonlarca tonun üzerinde uçucu kül elde edilmektedir. Bu küller, bir çok ülkede inşaat mühendisliğinin değişik alanlarında faydalanılmaktadır. Teknik avantajlarının olduğu kadar, ucuz oluşu ve çevre kirliliği oluşturmaması önemli özelliklerindedir. Genel olarak çimento ve klinker içerisine hammadde olarak katılabilir, zemin iyileştirmesinde de puzolan madde olarak kullanılabilir. Ayrıca tuğla ve hafif agrega üretiminde faydalanabilir. Bu kullanım olanaklarına karşın, ülkemizde yeterince değerlendirilememektedir.

ASTM C618 uçucu külleri iki ana sınıfa ayırmaktadır.

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70$  ise F Sınıfı fly ash,

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 50$  ise C Sınıfı fly ash

Uçucu küller, kireç veya kalsiyum bileşenleri ile reaksiyona girdiklerinde kalsiyum silikatlar (CS) oluştururken, yüksek alüminyum içeriklerinden de kalsiyum alüminat (CA) bileşenlerini oluştururlar. Çimento ile reaksiyona giren pozolan küller, çimentonun hidratasyonu esnasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile ayrıca kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği olan yeni kalsiyum silikat hidrat C-S-H oluşur. Kül bağlayıcı bir malzemedir. Ancak, hidrolik bağlayıcı değildir. Ülkemizdeki küllerin çoğu C-Tipi olduğundan içerisinde bulunan yüksek CaO miktarından dolayı ile tek başına kireç gibi bir miktar hidrolik bağlayıcılık gösterir (Koyuncu, 1998; Tuncan ve Ark, 1996).

Stabilizasyon çalışmasında kullanılan kül, Ankara Çayırhan Termoelektirik Santrali'nden alınan uçucu külüdür. Külün su muhtevası % 1-2 civarındadır ve elenmeden etüvde kurutularak kullanılmıştır. Koyu yeşil renkli ve küresel taneciklidir. Kullanılan uçucu külün sınıfı fabrika tarafından ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70$  olduğundan) C-sınıfı olarak tanımlanmaktadır ve bazı özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kullanılan uçucu küle ait bazı özellikleri

Katkı Maddeleri	pH	Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	Dane Özgül Ağırlığı	Dane Çapı Dağılımı (%)		
				Kum	Silt	Kil
Kül	10.83	3.41	2.31	6	84	10

## 4. DENEY YÖNTEMLERİ

Porsuk sedimentleri üzerinde yapılan deneyler üç başlık altında gruplandırılmıştır. Bunlar geoteknik deneyler, fiziko–kimyasal deneyler ve mikro–yapısal deneylerdir. Bu deneylerin bir kısmı Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında, bir kısmı Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü SEM ve XRD Laboratuvarında, bir kısmı Toprak ve Ekoloji Araştırma Enstitüsünde ve bir kısmı Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Islak Analiz laboratuvarında yapılmıştır.

### 4.1. Geoteknik Özellikler

Elek analizi, dane birim hacim ağırlığı, hidrometre analizi, Atterberg Kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Böylece sediment ve diğer katkı maddelerinin endeks özellikleri bulunmuştur.

#### 4.1.1. Su Muhtevası, Su İçeriği, Kuru Madde

Su muhtevası, su ağırlığının katı dane veya atık içerisindeki toplam katı maddeye oranlanması ile belirlenmektedir. Su muhtevası topaklanma, oturma, sızma ve absorblama özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. İyileştirme çalışmalarının tasarımında malzemelerin oranlarının belirlenebilmesi için öncelikli olarak belirlenmesi gereklidir (Cullilane ve Jones, 1989b). Çamur, sediment ve benzeri endüstriyel atıkların akışkanlığının belirlenmesi için su muhtevası kullanılmaktadır. Bu verilere dayanarak hacim–kütle ilişkileri de belirlenebilmektedir. (Filibeli, 1996) Porsuk sedimentlerinde su muhtevası atık yoğunluğu ile zemin yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

105 °C sıcaklıkta kurutulan örneklerin ağırlığında görülen kayıp “su içeriği

(Sİ)” olarak da adlandırılır. Örneklerin 105 °C sıcaklıkta kurutulmasıyla içindeki suyun uçurulmasından sonra kalan kısma ise “kuru madde (KM)” denir (Kocasoy, 1994).

Su muhtevasının belirlenmesinde ASTM D2216–80 (1985) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre örneklerden 100–200 gr alınarak 105 °C’de 48 saat kurutulmuş ve su muhtevaları belirlenmiştir.

#### **4.1.2. Ateşte Kayıp (Uçucu Madde) Miktarı ve Sabit Madde Miktarı**

Ateşte kayıp miktarı için numuneler 105 °C sıcaklıkta 24 saat kurutulmuş ve 550 °C sıcaklıkta 12 saat yakılmıştır (Al-Khaji, A. W., ve Andersland, O. B., 1981). Kuru maddenin yakıldıktan sonra gaz haline dönüşen kısma “uçucu madde (UM) veya kızdırma kaybı (KK)” adı verilir. Uçucu madde içeriği, organik madde içeriğine eşdeğer değildir; çünkü 550 °C sıcaklıkta inorganik maddelerin de bir kısmı ayrılarak uçucu hale gelmektedir. Kuru madde 550 °C sıcaklıkta yakıldıktan sonra geri kalan kısma “sabit madde (uçucu olmayan) (SM)” adı verilir. Sabit madde aynı zamanda “kül miktarı” olarak da adlandırılır.

#### **4.1.3. Birim Hacim Ağırlığı**

Ağırlığın hacme oranı olarak tanımlanır. Sedimentlerde organik maddelerin karışması ile birim hacim ağırlık azalırken, permeabilite ile porozite artmaktadır (Filibeli 1996, Yeşilsoy 1994).

Birim hacim ağırlığını belirlemek için, bilinen hacim–ağırlık esasları kullanılmıştır. Bir beher içerisine belirli bir hacimde konan sedimentlerin ağırlığı ölçülerek birim hacim ağırlığı bulunmuştur.

#### **4.1.4. Dane Özgöl Ağırlığı**

Birim hacimdeki dane ağırlığının aynı hacimdeki suya oranıdır. Zemin veya atıkların dane özgöl ağırlığı birim hacim ağırlığı gibi deneysel olarak ya da kütle hacim ilişkileri ile belirlenebilir (Cullilane ve Jones, 1989b).

Dane birim ağırlığının belirlenmesi için ASTM D854-83 (1985) tanımlanmış olan deneyi esas alınmıştır. İncelenecek olan kuru sediment örneklerinden 50 gr alınmış ve piknometreye konulmuştur. Piknometreye üç aşamada saf su eklenmiş ve içindeki hava bir vakum pompası ile alınmıştır. Deney yönteminde belirtilmiş olan formüllere göre örneklerin dane birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

#### **4.1.5. Dane Çapı Dağılımı**

Dane çapı dağılımı sedimentlerin ve atıkların iyileştirilmesi için seçilecek tekniğin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. İyileştirme yapılan atık ya da sediment yeniden kullanılabilir. İyi derecelenmiş sediment veya atıklar iyileştirme sonunda yüksek dayanıma sahip olabilmektedir. İnce daneli sediment ve atıklar ise daha kolay işlenebilmektedir. İnce daneli zeminler veya atıklar kimyasal stabilizasyon için uygun olurken düşük dayanıma sahip olmaktadır (Cullilane ve Jones, 1989b).

Dane çapı dağılımının belirlenebilmesi amacıyla yapılan elek analizi için ASTM D421-58 (1978) metodu ve hidrometre analizi için ASTM D422-63 (1972) metodu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise grafik olarak gösterilebilmekte ve buna bağlı olarak da derecelenme ve üniformluk katsayıları belirlenebilmektedir.

#### **4.1.6. Atterberg Kıvam Limitleri**

Atterberg kıvam limitleri bir sedimentin likitlik ve plastiklik su

muhtevaları değerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Killi bir sedimentin kıvamı su ilave edildikçe katı bir kıvamdan plastik bir kıvama yaklaşmaktadır. Bu durumda değişen su muhtevalarına bağlı olarak mühendislik davranışında değişiklikler gözlenmektedir. Atterberg kıvam limitleri sedimentin sınıflandırılmasında ve şişme ve dayanım karakteristikleri hakkında bilgi vermektedir (Cullilane ve Jones, 1989b).

Sedimentlerin plastik ve likit limitlerinin belirlenmesi için ASTM D4318–84 (1985) belirtilen deney yöntemi uygulanmıştır. Plastik limitin belirlenmesi amacıyla likit limit için hazırlanmış olan örneklerden bir miktar alınmıştır. Alınan örnek cam levha üzerine konularak avuç içi ile yuvarlanarak 3 mm çapında silindirler oluşturulana dek yuvarlanmıştır. Bu büyüklükteki silindirlerin su muhtevaları belirlenerek plastik limit değerleri belirlenmiştir.

## **4.2. Fiziko – Kimyasal Özellikler**

Numune pH, kation değişim kapasitesi, toplam metal miktarı, toplam organik madde miktarı belirlenmiştir.

### **4.2.1. pH Ölçümü**

pH ortamda bulunan  $H^+$  ve  $OH^-$  iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. Zemininin pH değeri ince daneli zeminlerin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Killerde pH değerinin artması ile dispersif bir yapı ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni ise dane yüzeyinde artan negatif yüklerdir. Bu durumda daneler birbirini iterek uzaklaşmaktadır.

Kil danelerinin adsorbsiyon özellikleri pH değerine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Kil danelerinin köşeleri düşük pH değerlerinde ortamın asidik özelliği nedeni ile pozitif yükle yüklenmektedir. Negatif yüzeyler nötrleşmekte ve elektriksel potansiyel de azalmaktadır. Bundan dolayı toplam metal miktarı üzerinde

pH belirleyici bir rol oynamaktadır (Tuncan vd., 1996).

Ortamın pH değeri kation değişim kapasitesini de etkilemektedir. Organik maddelerden ayrılan hidrojen iyonları ortamda serbest kalmakta ve pH değerinin artmasına neden olmaktadır. Kation değişim kapasitesinin değeri pH değerinin artmasına paralel olarak artmaktadır. Düşük pH değerleri için hidrojen iyonları yapıdan ayrılamamakta ve diğer kationlar ile yer değiştirememektedir. Yüksek pH değerlerinde ise tersi gerçekleşmektedir. (Koyuncu, 1998)

pH değerinin ölçümü için sediment örnekleri 40 numaralı elekten elenmiş ve 20 gr tartılarak bir behere konulmuştur. Daha sonra üzerine 50 ml saf su konulmuş ve ağzı kapatılmış ve 24 saat bekletilmiştir. Ölçümde kullanılacak olan cihaz ölçümden önce yarım saat çalıştırılarak standart çözeltiler ile kalibre edilmiştir. Çözelti bulunan behere elektrot daldırılarak okuma yapılmıştır. Elektrot tabana değmeyecek ve açıkta kalmayacak şekilde yerleştirilmelidir. Okuma süresi iki dakikadır. İlk dakikada beher hafifçe sarsılır ve ikinci dakikada okuma yapılır.

#### **4.2.2. Kation Değişim Kapasitesi**

Kation değişim kapasitesi (KDK), özellikle metal kationları gibi bazı kirleticilerin uzaklaştırılması için önemlidir ve ortam içerisinde değişebilir kationların miktarını belirler. Kation değişim kapasitesi ne kadar büyük ise, kirletici kationların ortamda bulunabilme derecesi o kadar yüksek olmaktadır.

Kation değişim kapasitesinin hesaplanabilmesi için kolon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar yöntemidir. Öncelikle sediment örnekleri 100 ve 200 numaralı eleklerden elenir ve iki elek arasında kalan örnekten 10 gr alınır. Bu örnek bir cam kolona yerleştirilir. Bu örneğin üzerinden iyondan arındırılmış saf su sabit debi ile geçirilir. Bu işlem için debisi ayarlanabilir bir pompa kullanılır. Suyun cam kolonda seviyesi sabit tutularak debinin sabit kalması sağlanır. Kolonun alt tarafında yer alan musluk ile debi sabit tutulur. Kolondan geçen debi 5 ml/dk olarak seçilir. Bu durumda 300 ml iyonize hale gelmiş su elde etmek için 1 saat süre ile kolondan su geçirilir. Her 10 dk bir

kolonun altında yer alan kap değiştirilir ve etiketlenir. Etiketlenen kaplardan 1 ml örnek alınır ve üzerine saf su konarak 100 ml tamamlanır. Bu işlem den sonra Flame Photometer Spectrometer ile toplam sodyum miktarı okunur ve katyon değişimi kapasitesi hesaplanır. Eğer 100 ml tamamlandıktan sonra ölçülen değerler, ölçüm aralığının üzerinde 0 ile 100 arasında kalıyorsa örnekten 0,5 ml alınır ve 100 ml'ye tamamlanır. İşlem bu örnek üzerinde tekrarlanır.

#### **4.2.3. Elektriksel İletkenlik**

Sıvı, atık ve daneler arasındaki elektriksel iletkenlik, ortamın elektriği iletebilme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Elektriksel iletkenlik ortamdaki iyon miktarı ile doğru orantılı olarak artar. Yapılan araştırmalar çözelti içinde yer alan kil danelerinin sayısının artması ile dane yüzeyinde yer alan iyonların çözeltiye karıştığını göstermiştir. Dolayısıyla da katyonların sayısındaki artış elektriksel iletkenlikte artışa yol açmaktadır. Kolloidal danelerin hareketliliğindeki artış da elektriksel iletkenliğin artmasına yol açar. Elektriksel iletkenlik ayrıca yüzey alanı ile ilişkilidir. Dane yüzeyi arttıka elektriksel yük artmaktadır (Koyuncu, 1998).

Sediment örnekleri laboratuarda 18–21 °C'de oda sıcaklığında üzeri açık olarak kurumaya bırakılmıştır. Sediment örnekler tamamen hava kurusu normuna ulaştıktan sonra dövülerek 20 numaralı elekten elenmiş ve 150–250 gr alınarak saf su ile bir beher içinde doğgun hale getirilmiştir. Doğgun hale getirilen örnekler ağzı kapalı olarak 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra, çözeltilerin iç erisine elektrot daldırılarak numunenin elektriksel iletkenliği elektriksel iletkenlik ölçer ile belirlenmiştir.

#### **4.2.4. Organik Madde Miktarı**

Organik madde miktarının belirlenmesi için potasyum dikromat yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde 200 numaralı elekten geçen örnekten 0,5 ile 0,2 gr

örnek alınır. Alınan örnek, etüvde 24 saat bekletilerek kurutulur. Kurutulmuş örnek 750 ml erlene aktarılır. Üzerine 1 N  $K_2Cr_2O_7$  (potasyum dikromat) çözeltisi konur. Üzerine ise % 96'lık  $H_2SO_4$  (sülfirik asit) ilave edilir. Bu işlemden sonra yarım saat beklenir. Daha sonra 150 ml su eklenerek seyreltilir. Oluşan renk değişimin gözlenmesi için 10 ml derişik  $H_3PO_4$  çözeltisi eklenir. Renk değişimin gözlenmesi için 8–10 damla difenil amin katılarak mohr tuzu eklenir ve yeşil renk elde edilene dek titrasyona devam edilir. Titrasyon işlemi için eklenen çözelti miktarı hesaplanarak organik madde miktarı belirlenir (Tüzüner, 1990).

#### 4.2.5. Toplam Metal Miktarı

Metaller zemin içerisinde kil tarafından adsorbe edilirler. Bu işlem katyon değişim mekanizması ile gerçekleşir. Metallerin adsorbe edilebilmesi için metal cinsine, kil mineraline, ortamın pH değerine ve ortamın sıcaklığına bağlıdır.

Ağır metal kirliliği içeren atıksular biyolojik oksijen ihtiyacı değeri düşük, genellikle asidik, suda yaşayan ve bu suyu kullanan canlılar için çok zehirli, kendi kendine temizlenme veya arıtmada etken mikroorganizmaları öldürücü nitelikte inorganik karakterli sulardır. Kirliliği yapan arsenik, civa, kurşun, krom, kadmiyum, nikel, demir, bakır, çinko gibi ağır metal iyonları ile radyoaktif elementlerdir.

Toprak asitliği artınca ağır metallerin mobilizasyonu ve dolayısıyla da ağır metal konsantrasyonu artar. Kurşun, çinko ve bakırın birlikte kirlettiği topraklarda ağır metaller, organiklerin parçalanmasını önleyen kombine etkileri görülmektedir ve bunun sonucu olarak topraklarda bozulmalar oluşmaktadır. Kirli topraklarda bitkiler tarafından alınan ağır metaller aşağıdaki sıraya göre artış gösterir:



Metal zemin içindeki kil mincrallerinin yüzeylerine katyon değişim kapasitesi ile adsorbe olur. Bu metaller organik maddenin kil daneleri üzerine

adsorbe edilmesinde önemli rol oynar. Metaller genellikle kil zeminlere veya organiklere sıkıca bağlıdır. Metal ile zemin veya toprak arasında katyon değişim kapasitesi ve kimyasal taşınma gibi bazı işlemler meydana gelir. Bu işlemler metal tipi, zemin tipi/özellikleri, pH ve sıcaklık gibi faktörlerle etkilenir. Krom, kurşun, çinko ve mangan gibi ağır metaller suda çözünebilmektedirler (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

### **Bakır (Cu)**

Bakır elementi genellikle mangan ve demir'in hidroksit oksitleri ile meydana gelir. Bakır'ın adsorpsiyonunda organik madde ve serbest mangan oksitleri önemlidir. Yeryüzündeki ortalama bakır içeriği 2-40 mg/kg, kirlenmiş topraklarda ise 1000 mg/kg'dır. Yüzeysel sularında bulunan bakır bitkiler için zararlıdır. Bakır elementi sudaki canlılar için kuvvetli toksik nitelik taşıyan bir elementtir. Maksimum bakır miktarları, petrolü sondaj atıklarında 100 mg/kg, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 1-190 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 36 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 500 mg/kg'dır. Sudaki maksimum bakır miktarının 0.2 mg/l olması gerekmektedir .

Fazla organik madde içeren zeminlerde bakır miktarı azdır. Bitkiler tarafından iki değerli bakır katyonu olarak alınır. Bakır fazlalığı, bitkilerin demir almasını güçleştirir. Toprakta bakır ile organik madde arasındaki ilişki önemlidir. Topraktaki bakırın önemli bölümü zor çözünebilen veya çözünmeyen organik ve inorganik bileşikler olarak bulunur.

Organik maddelere, mangan ve demir oksitlere bağlı bulunmaktadır. Bunun dışında silikatlara bağlı olarak, az miktarda değişebilir ve çözünebilir formda bulunmaktadır. Ilıman bölgelerde Cu içeriği %25-75 organik maddeye, %15-70 mangan oksit ve demir oksitlere ve % 1-10 silikatlara bağlı olduğu saptanmıştır.

Mangan oksit ve demir oksitlere, ve aynı zamanda organik maddelere bağlı

bulunan bakırın büyük kısmı çok kuvvetli bağlı ve zor adsorbe edilir şekildedir. Bunun için değişebilir bakır içeriği  $pH > 5$  durumda genel olarak %1 civarındadır.

Ortamda organik kompleks oluşturucular bulunduğu zaman ve  $pH > 6$  olduğu durumda (bakırın % 99'unun üzerinde) hemen hemen tamamı organik kompleksler şeklindedir. Her Őeyden önce organik atıkların mikrobiyal ayrışması sırasında oluşan veya canlı kökler tarafından salgılanan küçük moleküllü kompleks yapıcılar adsorbe edilmiş bakır kompleksleri oluşturarak, mobilize ederler ve bu yolla cznebilir bakır czeltisinin konsantrasyonunu bir hayli yükseltir.

Bakır birçok ürünün elde edilmesinde (bakır telleri, elektrik iletim telleri, elektronik endsrisinde) kullanılmaktadır ve endüstrilerin atıksularında da yığılan sedimentler üzerindeki değerleri ortalama 530 mg/kg kuru ağırlık, aşırı durumlarda da 5300 mg/kg kuru ağırlığa kadar çıkabilir. Aynı Şekilde arıtma cmurlarında bakır içeriği 10.000 mg/kg kuru ağırlık düzeyine kadar çıkabilmektedir.

Çeşitli bitkilerde yaklaşık 20 mg/kg kuru ağırlık üzerine bakır zehirliliği saptanmıştır. Bazı bitkilerin besin czeltisinde 0.1 mg/l konsantrasyonu aynı Şekilde olabilmektedir.

Bakır cznebilirliği ve alınabilir duruma geçmesi,  $pH < 5$  olduğu durumlarda daha belirgin olarak yükselir. Eğer toprağın pH değeri 6'ının üzerine çıkarsa, bakırca zengin kuvvetli asit topraklarda Cu toksitesisi azalmaktadır. Aynı zamanda yüksek fosfat da bakır alımını etkilemektedir.

İçerisinde 100 mg/kg'dan fazla bakır içeren atık suların ve arıtma cmurların toprağa verilmesi sınırlandırılmıştır. İçinde 100 mg/kg bulunması halinde bile, mera otlarında bakır içeriği ck yüksek olur (15 mg/kg kuru madde) ve koyunlarda zehirleyici etkide bulunur (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

## **Çinko (Zn)**

Çinko tuzlarının zehirliliği oldukça düşüktür. Çinko kirliliği maden operasyonlarından ve galvenize boruların paslanmasından olabilir. Maksimum inko

miktarları, petrolü sondaj atıklarında 300 mg/kg, Almanya temiz toprak içerisinde 300 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 300 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 2-180 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 140 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 3000 mg/kg'dir. İçme suyundaki maksimum çinko miktarının 0.5 mg/l olması gerekmektedir .

Organik madde miktarı fazla ise çinko miktarı da fazladır. Bitkiler tarafından  $Zn^{+2}$  şeklinde alınır. Toprakta katyon halinde veya mineral bünyesinde bulunmaktadır. Çinko çözünürlüğü pH değeri 5.2'den küçük ve 6'dan büyük olursa azalır. Topraktaki çözünebilir çinko, ancak %1'dir. pH değeri yüksek olursa bu çözünmeyen miktar %0.1'lere düşer. Toprağın asitliği arttıkça yani toprağın pH değeri azaldıkça çinko bileşiklerinin çözünürlüğü artar. Toprak içindeki fazla çinko, bitkilere ve mikroorganizmalara toksik etki yapar. Kirlenmemiş topraklarda çinko içeriği 10-80 mg/kg'dır.

Kirlenmiş topraklarda çinko bileşikleri şeklinde bulunur. Toprağın pH değerine göre ve kirliliğin derecesine göre çinko bileşik miktarı değişir. Hafif asitli kirlenmemiş topraklarda toplam çinkonun %40 ile %60'ı organik bağlıdır. pH>7 olduğunda çinkonun mangan oksit ve demir oksitleri artmaktadır. Kirlenmiş topraklarda ise çinkonun oksitlere bağlı miktarı %85'i civarına ulaşmaktadır.

Çinko diğer ağır metallerde olduğu gibi oksit partikülleri arasına difüze olur ve orada kuvvetlice tutulur. Oksitlerin tekrar çözünmesiyle bir mobilizasyon mümkün olabilmektedir. Çinko, ferri oksit, götit oksit gibi çinko oksitler içerisine veya smektit gibi çeşitli kil minerallerine içine difüze olur.

Aşırı kirli topraklarda belirlenen çinko bileşikleri,  $ZnFe_2O_4$  (Franklinit) ve özellikle pH>7 olduğunda çinko silikatlar ( $Zn_2SiO_4$ ), çinko fosfat ( $Zn_2(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ) ve çinko karbonat ( $ZnCO_3$ ,  $Zn_5(OH_6)(CO_2)_2$ ) şeklinde oluşmaktadır. pH değeri 6'nın üzerine çıkarsa değişebilir çinko miktarı azalmaktadır.

Çinko endüstride kullanılan ağır metallerin başında gelmektedir. Paslanmaya karşı demirin galvanize edilmesi, çelik üretimi ve çeşitli alaşımlar çinko ile yapılır.

Arıtma çamuruyla, yerleşim yerlerinin çöplüklerinin kompostlarıyla ve

bunun gibi balçıklarla da çinko birikimi olmaktadır. Bunların çinko içeriği 3000 mg/kg kuru maddenin altındadır. Endüstri bölgelerindeki arıtma çamurlarında çinko içeriği çok yüksek (10.000 mg/kg kuru ağırlık) olmaktadır. Yıllardan beri verilen atık sularla da toprağın çinko zenginleşmesi sağlanmaktadır.

Almanya arıtma çamuru yönetmeliğine göre çinko için toplam 300 mg Zn/kg'dır. Hafif asitten nötr aside kadar bu miktardan bir çinko zehirliliği beklenemez. pH<5-6 olduğunda çinko çözünürlüğü ve alınabilirliği artması nedeniyle bu sınır değeri yüksektir. Bunun için bu sınır değer 150 mg/kg toprak miktarına düşürülmelidir.

Çinko ile kirlenmiş toprakların ıslahında kireçleme ile pH değerini 7 ve daha yüksek değere çıkarmak gerekmektedir. Demir oksitin uygulanması da çinko bağlanmasına etki edebilmektedir (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

### **Kadmiyum (Cd)**

Ağır bir metal olan kadmiyum saf olarak doğada bulunmaz. Kadmiyum genellikle pil, boya ve plastik yapımında ve paslanmayı önlemek için civatalarda, perçinlerde kullanılır. Sigara dumanında oldukça fazla miktarda olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyum, demir ve mangan oksitlerin, klorürlerin ve organik maddelerin bir karışımıdır. Kadmiyum, çinko cevherinde oluşur ve çinko metalürjisinin önemli bir yan ürünüdür. Zeminin pH'i zemin içindeki kadmiyumun çözünürlüğünün en önemli bir faktörüdür. Çözünürlük zeminin pH değerinin azalması ile artar. İnorganik bir kimyasaldır. Maksimum kadmiyum miktarları, petrolü sondaj atıklarında 5 mg/kg, Almanya temiz toprak içerisinde 3 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 3 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 0.04-2 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 0.8 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 20 mg/kg, EPA değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 1 mg/l, EPA değerlerine içme suyunda 0.01 mg/l'dir. Kadmiyumun su içindeki maksimum değeri 0.01 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991).

Hayvanlar ve insanlar için çok düşük konsantrasyonlarda bile zehirli bir

elementtir. Kemik deformasyonuna ve iskelet bozukluğuna yol açar. Ayrıca böbreklerde fonksiyon yetersizliğine (proteunuri) ve yüksek kan basıncına neden olur. Solunumla fazla alınması sonucu ciğer anfizami hastalığına yol açar. Ayrıca kanserojen etkili olduğu tespit edilmiştir.

World Health Organization (WHO-Dünya Sağlık Örgütü), haftalık 0.4-0.5 mg kadmiyum miktarını tolere edilebilir olarak kabul etmektedir. Bu miktarın %40'ı sıvı ve katı yiyeceklerce alınmaktadır. Kirlenmemiş topraklarda 0.5 mg/kg değerinden düşüktür. Kimyasal olarak çinko ile akrabadır ve Zn/Cd oranı topraklarda yaklaşık 100 civarında sabit bir değerdir.

Kirli topraklarda kadmiyum oranı yüksektir. Japonya'da Hai-Hai hastalığı ortaya çıktığında, bölgedeki çeltik topraklarında 53 mg/kg kadmiyum saptanmıştır. En önemli kadmiyum kaynakları, endüstriyel tesislerden çıkan atıklar, cürüfla maden yatağı üzerinden sıyrılan topraklar, kirli hava, fosfat gübrelere, arıtma çamurları, taşıt araçları ve nehirlere verilen atık sular oluşturmaktadır. Toprağa 33 gr/ha. kadmiyum uygulanmasından sonra, 12 yılda devamlı yeşil alanda toprağın üst 10 cm'sinde 0.1 mg/kg kadmiyum değeri tespit edilmiştir. pH değeri arttıkça kadmiyum adsorbsiyonu artar, çözünürlük azalır. Kadmiyum konsantrasyonu pH, 7'de en az, pH 6.0 ile 6.5 arasında hızla artar.

Kadmiyum, çinko, talyum, mangan ve nikel ile birlikte hareketli, kolay taşınabilen ve kolay alınabilen bir ağır metaldir. Asidik ortamda, taşınma hızı yüksektir. Toprakta 10 yılda 50 cm'den fazla, 45 yılda 120 cm hareket edebilir (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

## **Krom (Cr)**

Krom elementi toprakta (zeminde) diğer metallere farklı olarak az miktarda bulunmaktadır. Krom genellikle endüstride kalay (alloys), katalitik, krom oksit ve krom tuzları için kullanılır. Krom tuzları temizlik solüsyonları ve boyalarda kullanılır. Rafineri atıklarında oldukça fazla miktarlarda bulunan bir ağır metaldir. Krom zehirlenmesi deri bozukluklarına yol açmaktadır. Krom İnorganik bir

kimyasaldır. Zemin içinde taşınabilen ve en fazla çözünebilen bir metaldir. Kromun zararlı şekli kromat ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) gibi kromun hexavalent veya dikromat ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) durumudur. Aerobik ortamlarda hexavalent şekli trivalent krom şekline hızlıca indirgenir. Böylece çözünemeyen hidroksitler ve oksitler şeklini alır. Dolayısıyla, kromun sızması zorlaşmaktadır. Kromun toprak içindeki kil minerallerine adsorbe edildiği ve çözünürlüğünün  $\text{pH}>4$  olduğu koşullarda gerçekleştiği ve  $\text{pH}=5.5$  civarında ise çöktüğü bilinmektedir. Maksimum krom miktarları, petrolü sondaj atıklarında 100 mg/kg, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 0.5-110 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 100 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 800 mg/kg, EPA değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 5 mg/l, EPA değerlerine içme suyunda 0.05 mg/l'dir. Krom elementinin içme suyundaki maksimum değeri 0.05 mg/l olmalıdır.

$\text{Cr(III)}$  bileşiklerinin ve metalik kromun toksik etkisi azdır. Ancak  $\text{Cr(IV)}$  bileşikleri 100 ile 1000 kez daha toksikdir. İnsanlarda akut ve kronik zehirlenmeye yol açar. Kromat ve dikromatlar deri zehirlenmelerine yol açar.

Endüstride paslanmaz çelik üretiminde, lehim ve pas önleme üretimlerinde, yapı malzemelerinden boya, cila cam ve seramik malzemelerinde ve deri endüstrisinde kullanılır. Almanya'da 100.000 ton krom üretilmekte ve bunun 25.000 tonu çevrede hava, su ve toprağa verilerek kirlilik meydana getirilmektedir.

Toprakta en önemli krom minerali kromat ( $\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$ )'dır. Toprakta krom miktarı, pH ve redoksa bağlı olarak  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Cr(OH)}_3$ ,  $\text{CrO}_4$  formunda bulunabilir. Suda çözünebilen krom miktarı çok azdır. Krom ile kirlenmiş toprakların ıslahı için,  $\text{Cr(IV)}$  bileşiklerinin  $\text{Cr(III)}$  bileşiklerine dönüştürülmesi ve  $\text{Cr(III)}$ 'ün immobilize edilmesi gerekmektedir (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

## **Kurşun (Pb)**

Kurşun elementinin çözünebilirliği zemin içinde bulunan organik madde, karbonat, hidroksit, fosfat ve sülfat miktarı ile ilgilidir. Zemin içindeki mevcut

fosfor ve pH değeri azalır ise, kurşunun çözünübilirliği artar. Maksimum kurşun miktarları, petrolü sondaj atıklarında 100 mg/kg, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 2-200 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 85 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 600 mg/kg, EPA değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 5 mg/l, EPA değerlerine içme suyunda 0.05 mg/l'dir. Su içindeki maksimum kurşun miktarı 1 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991). İnorganik bir kimyasaldır.

Kadmiyum ve civaya göre daha az zehirlidir. İnsan ve hayvanda ciğer, böbrek ve özellikle kemik ve dişlerde birirmektedir. İnsanlarda gıda maddelerince ve solunum yoluyla alınabilir. Hemoglobun sentezinde görev alan enzimleri engeller, anemi oluşur. Solunan kurşunun % 30'u ciğerde birikir.

Almanya'da 1982 yılında 330.00 ton kurşun tüketilmiş ve bunun yaklaşık 3/4'ü yeniden kullanılmış, 1/4'ü ise çevrede kalmıştır. Kurşun özellikle hava hareketleri ile toprağa ulaşmaktadır. 1982 yılında Almanya'da yaklaşık 5500 ton kurşun atmosfere verilmiştir. Bunun 3400 tonu motorlu araçlardan kaynaklanmıştır.

Kurşunun çözünürlüğü, ortamın pH değeri, toplam kurşun içeriği, redoks koşulları ve diğer maddelerin durumu ile etkilenir. Kadmiyum, çinko ve nikelin aksine kurşun toprakta son derece immobil (hareketsiz) bir elementdir. pH değeri 5'den büyükse çok az çözünür. Kurşun, spesifik adsorbsiyon özelliğinden dolayı diğer tüm metallerden daha kuvvetli olarak toprağa bağlanır.

pH artışı ile, demir oksit, mangan oksit ve alüminyum oksit kurşunun bağlanmasını arttırır. pH değeri 4.5-5.0'den büyük olması halinde kurşunun ancak çok azı alkali ve toprak alkali reaksiyonlarınca desorbe edilebilmektedir.

Hafif asit ve alkali reaksiyonlarında toplam kurşunun %75-85'i oksitli formda bulunur. Az kirli toprakların (toplam kurşun miktarı 25-95 mg/kg toprak) demir ve mangan miktarlarında ortalama 2500 mg/kg kurşun ölçülmüştür. Kurşun, organik maddelerle hareketsiz forma dönüştürülür. Yani metal-organik kompleksleri oluşturur.

Kurşun ve fosfor içeriği yüksek olan topraklarda pb bileşikleri çok zor

çözünen fosfatlar olabilir. Mesela  $Pb(PO_4)_2$ ,  $Pb_4O(PO_4)_2$ , OH,  $Pb_5(PO_4)_3OH$  gibi. Karbonatlı topraklarda bir miktar kurşun karbonat  $PbCO_3$  oluşur. İndirgen koşullarda sülfür iyonlarının varlığında kurşun sülfürler  $PbS$  meydana getirir.

Toprakta kurşun taşınması ve yıkanması, çözünürlüğün düşük olması ile çok az olur. Yapılan çalışmalar, kirli ortamlarda kurşunun %80'inin ilk 20 cm'lik üst toprakta tutulduğunu göstermiştir. Asidik topraklarda verilen kurşunun % 99'unun 10 yıllık sürede toprağın üst 50 cm'sinde tutulduğu belirlenmiştir.

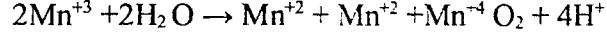
Kurşun ile kirlenmiş toprakların pH'sını nötre doğru ayarlamakla, bitkilerin pb alımı da azalır. Toprağın kurşun içeriği fazla ise bitkide çeşitli klorozlar ve kök ve kök üstü organlarda büyüme zararları ortaya çıkar. Ayrıca mikrobiyel aktivite olumsuz yönde etkilenir (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

## **Mangan (Mn)**

Mangan elementi demir elementine benzer şekilde metaller içinde toksitesi en az olan element grubunda yer almaktadır. Ancak içme suyunda 0.5 mg/l olması durumunda içme suyuna mürekkep tadı ve kokusu verdiği bilinmektedir. Maksimum mangan miktarları, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 2-200 mg/kg, ASTM değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 1 mg/l, EPA değerlerine içme suyunda 0.05 mg/l'dir. İçme sularında mangan konsantrasyonunun 2 mg/l değerinden fazla olmaması istenmektedir.

Zemin pH değeri azaldıkça (asit durumu arttıkça) manganın çözünürlüğü artar. pH değeri 6'dan büyükse mangan çözünürlüğü hızlı artar. Bu nedenle kireçli topraklarda değişebilir durumda tutulan mangan miktarı çok azdır.

Mangan toprak çözeltisinde iyon ve organik kompleksler şeklinde bulunur. Mangan, bütün ağır metaller içinde en düşük stabilitede kompleksler yapar ve bu nedenle diğer katyonlar tarafından kolayca yerinden atılabilir. Asit topraklarda manganın büyük bir kısmı  $Mn^{+2}$  iyonu şeklinde bulunur. Mikrobiyolojik redüksiyonla aşağıdaki gibi oluşur.



Kilce zengin kuvvetli asit topraklarda (pH<5), toprak çözeltisindeki Mn+2 konsantrasyonu yüksektir ve bitkilere toksik etki yapar (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998).

## Nikel (Ni)

Nikel elementi zemin içindeki mevcudiyeti demir ve mangan hidroksitleri ve organik maddeler ile mümkündür. Nikel, bakır ve çinko'dan farklıdır. Asit zeminler, zemin solüsyonu içindeki nikel'in çözünebilirliğini artırır. Nikelin kanser yapıcı özelliği vardır. Topraklarda nikel oranı düşüktür. Fazla oranda nikel içeren topraklarda bitki zehirlenmeleri meydana gelir. Maksimum nikel miktarları, Almanya temiz toprak içerisinde 50 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 2-400 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 35 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 500 mg/kg, Japon değerlerine içme suyunda 3 mg/l'dir. Su içindeki maksimum nikel miktarı 0.2 mg/l olmalıdır.

Dünya nikel üretimi, 750.000 tondur. Çelik ve alaşım üretiminde, galvaniz ve elektronik endüstrilerinden atık ve atık sularla birikim gösterirler. Toprağın nikel ile havadan kirlenmesi ise, genelde kömür ve petrolün yanmasıyla ve motorlu araçlardan toprağa bulaşır.

PH değerinin 6'dan az olması durumunda (pH<6.0) suda nikel çözünürlüğü ve değişebilir nikel içeriği artmaktadır. Toprakta pH<7.5'da Ni<sup>+2</sup> formunda ve organik nikel kompleksleri şeklindedir. Nikel toprakta, karbonat, sülfür ve fosfat miktarına göre NiHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, NiCO<sub>3</sub>, NiSO<sub>4</sub> ve NiHPO<sub>4</sub> gibi değişik bağlantı formları bulunur.

pH değeri azalır, nikel alınabilirliği artar. Nikel alınabilirliği, kil minerali ve demir-oksit ve mangan-oksitlerin artışı ile azalır. Nikel içeriği yüksek

topraklarda, kireçleme ile pH=7 dolaylarına getirilmesi, bitkilerin zehirlenmesini önlemektedir. Çözünebilir ve kolay hareket edebilir nikel miktarının bulunması ve toplam miktarın belirlenmesi ile alınabilir bitki-nikel içeriği belirlenebilir (Tuncan vd., 1996, Koyuncu 1998)

Toplam metal miktarının belirlenmesi için yaş yakma yöntemi kullanılmıştır (Bernas, 1968). Örnekler 105 C'de etüvde 24 saat kurutulup, 200 numaralı elekten elenmiştir. Elenen örnekten 1 gr alınıp 100 ml konsantre HNO<sub>3</sub> + Konsantre HCl (1:3) asit (kral suyu) ile tamamen buharlaşmaya kadar yaklaşık 1 gün boyunca yakılmıştır. Daha sonra kalan tortu 1:10 seyreltik HCl ile yıkanarak süzümüştür. Bu işlemden sonra soğumaya bırakılan asit karışımı gözenek çapı 0.2 mm olan selülöz nitrat kağıdı kullanılarak süzümüştür. Perkin Elmer Atomic Absorbtion (AA) Spectrometer 3110 cihazı ile ağır metal miktarları belirlenmiştir.

### **4.3. Mikro-Yapısal Özellikler**

Sedimentlerin mikro yapısal özelliklerinin belirlenebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

#### **4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu Fotoğrafları-SEM**

Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi şu şekildedir. Elektron bombardımanına tutulan sedimentin elektronları dağıtması ve bu elektronların fotoğraf plakası üzerine düşerek görüntüsünün alınmasıdır.

Sedimentlerin mikro yapısal özelliklerinin gözlenmesi için taramalı elektron mikroskopu uygun bir alettir. Sediment parçacıkları, domainler, agregalar, aglomeralar, floklar ve organik bileşiklerden oluşmaktadır. Sedimentlerin bu mikro yapı özellikleri, içindeki minerallere, atık maddelere ve organik maddelere bağlıdır (Shields 1991).

Örnekler SEM fotoğraflarının çekilmesi için laboratuara götürülmüş ve

laboratuar personeline hazırlanmışlardır.

#### **4.3.2. X Işınları Kırınım Analizi (XRD)**

XRD yöntemi, özellikle optik yöntemler (polarizan mikroskop altındaki incelemeler) ile incelemelerin sınırlı veya imkansız olduğu kayaç, cevher, kil mineralleri, endüstriyel hammaddeler ve kristalen malzemeler ile böbrek taşlarının nitel ve nicel olarak incelemelerinde kullanılan en önemli mineralojik analiz yöntemlerinden birisidir. XRD veya elektron kırınım yöntemlerinin mineralojik tanımlama prensipleri aynı olup, her bir kristalen maddenin kendisine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınları veya elektronları karakteristik bir düzen içerisinde kırma esasına dayanır. Kayaç ve mineral numuneleri ile böbrek taşları çelik havanda kırıldıktan sonra agat havanlarda iyice öğütülüp toz haline getirilir. Toz haline getirilen numuneler analiz sırasına girmek üzere numaralanarak plastik kaplarda saklanır. Analiz edilecek örnekler cam lamlara konularak XRD cihazlarının özel örnek localarına yerleştirilir ve analiz edilir. Analiz edilen örneklerin XRD grafikleri çekilerek ASTM indeks kartlarına göre değerlendirilmeleri yapılır. Böylece örneklerin mineral bileşimi elde edilmektedir.

#### **4.4. İyileştirme Metotları**

Kirlenmiş sedimentlere uygulanabilen genel iyileştirme metotları literatürde, fiziksel, kimyasal ve biyolojik metotlar olarak ayrılmaktadır.

##### **4.4.1. Fiziksel Metotlar**

Fiziksel işlemler, genellikle sıvının bertaraf edilerek, katı kısımdan ayrılmasını sağlayan iyileştirme yöntemidir. Fiziksel metotların literatürde değişik uygulamaları olmasına karşın, en çok uygulama alanı olanlar aşağıda verilmiştir

(EPA 1986)

- Buharlaştırma
- Yıkama
- Havalandırma
- Organiklerin vakumla çekilmesi
- Elektrokinetik iyileştirme

#### 4.4.2. Kimyasal metotlar

Atık ve zeminde kimyasal ayrışma meydana getiren bir yöntemdir. Kimyasal ayrışmada fiziksel olarak parçalanmanın ötesinde, çözünmeler ve ayrışmalar meydana gelir. Bu kimyasal metotlar şu şekilde sıralanabilir.

- Asit/baz nötralizasyonu
- Hidratasyon
- Oksidasyon
- Redüksiyon
- Çözünme
- İyon Değişimi
- Kimyasal Bozunma
- Hidroliz
- Karbonatlaşma
- Biyolojik ve Çöktürme

#### **4.4.3. Biyolojik Metotlar**

Atığın bünyesinde bulunan organik ve kısmen de inorganik kirletici maddelerin, mikroorganizmalar tarafından besin kaynağı olarak kullanılmak suretiyle atıktan uzaklaştırılması (EPA 1990).

#### **4.4.4. Isıtma sistemleri**

Isıtma ile organik hidrokarbonların zeminden ayrılması işlemleridir (Brown, 1991). Zeminin ısıtılması, radyo frekansı ile veya direkt elektrik akımı ile yapılmaktadır. Bu fiziksel ısıtma ile zemine adsorbe olmuş ağır, buharlaşamayan bileşenler, desorbe olur (ayrılır) ve ısı ile buharlaşır. Birçok çalışmada, zeminde organiklerin kaynama sıcaklığı olan 150C yi aşıldığında, bileşenler zeminden desorbe olmaktadır ve % 99'luk bir iyileştirme elde edilebilmektedir (Ayer, 1991).

#### **4.4.5. Diğer Metotlar**

Tehlikeli atık ve kirli zeminlere uygulanan birçok farklı metot vardır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

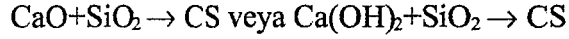
- Yakma
- Yerinde depolama
- Saha Dışına Uzaklaştırma

#### **4.4.6. İyileştirme (Stabilizasyon) Metotları**

Bütün iyileştirme yöntemlerinin asıl amacı, zararlı atıklar içerisinde bulunan kirlilikleri azaltmaktır. Kimyasal iyileştirme metodunda atık içerisine ilave

malzemeler karıştırılır. Bu amaçla pozolanik ve bağlayıcı değeri yüksek malzemeler kullanılır. Atık malzeme fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak iyileştirilir ve atıklardaki kirlilik bağlanır (sabitlenir), kimyasal özellikleri değişir ve fiziksel özellikleri iyileştirilir (EPA, 1990; Hwang, 1988; Conner, 1990).

İyileştirmenin en önemli amacı pozolanik reaksiyonlardır. Pozolanik reaksiyon silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina (Al) ile kalsiyum (Ca) arasında çimentolaşma reaksiyonları oluşturmaktır. Oluşan reaksiyonlar sonunda betona benzer çok stabil kalsiyum silikat (CS) veya kalsiyum alüminat (CA) oluşur. Bu reaksiyonlar zamana, ortamın sıcaklığına ve su içeriğine bağlı olarak değişebilir ve kabaca şu şekilde ifade edilebilir.



Bu pozolanik reaksiyonlar sonucunda sediment daneleri daha iri hale gelir. Likit limit azalır yani atık daha az plastik davranış gösterir. Bu şekilde meydana gelen reaksiyon ani bir reaksiyondur ve zamana bağlı değildir (Pamukçu, et al., 1989; Tuncan vd., 1996).

## 5. SEDİMENTLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada sediment örnekleri alınan istasyonların bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

### 5.1. İstasyonlar

#### 5.1.1. Çalca

Çalca istasyonu Kütahya Şehrinin çıkışında bulunmaktadır. Porsuk kaynağından olan uzaklığı 155 kilometredir. Bu istasyondan önce nehre birçok sanayi tesisi atıkları atılmaktadır. Özellikle TÜGSAŞ azot fabrikası, manyezit ve Seyitömer termik santrali gibi potansiyel kirleticiler atıklarını nehre boşaltmaktadır. Bu nedenle Çalca bölgesi çok kirlidir. Bu istasyondan önce bulunan bazı önemli kirletici kaynakları Tablo 5.1.'de verilmiştir. Çalca istasyonunda gözlenen Porsuk Nehir suyu da çok bulanık ve kirlidir. Ayrıca çevreye kötü bir yaymaktadır.

Kütahya İlinin 1997 Genel Nüfus Sayımı sonuçlarına göre toplam nüfusu 643 117 kişidir. Kentin Arıtma tesisi genellikle çalışmadığından kanalizasyonu doğrudan Porsuk Nehrine verilmektedir.

Çalca istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, katyon değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

### 5.1.2. Beşdeğirmen

Beşdeğirmen istasyonu Kütahya Şehrine yaklaşık 15 km uzaklıkta ve Porsuk kaynağından olan uzaklığı 165 kilometredir. Burada Nehir suyunun kirlilik yoğunluğu Çalca istasyonuna göre daha azdır. Kütahya çıkışında yer alan yoğun kirlilik nehir tabanına çöklediğinden burada gözlenen kirlilik ve koku nispeten azalmış görünmektedir. Bu istasyondan önceki bazı önemli kirlenici kaynakları Tablo 5.2.'de verilmiştir. Beşdeğirmen istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, kation değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, azot, fosfor, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), enerji, X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

### 5.1.3. Porsuk Barajı Girişi-Sabuncupınar

Porsuk Barajı Sulama ve taşkın önleme amaçları için Porsuk Nehri üzerine kurulmuştur. Bir bölümü Eskişehir il sınırları içinde yer alır. Yüksekliği 49,70 metre ve su depolama hacmi 525 milyon m<sup>3</sup> dür. Porsuk Barajı Girişi, Sabuncupınar Mevkiine birkaç kilometre yakınındadır ve Kütahya Şehrine yaklaşık olarak 25 km uzaklıktadır. Porsuk kaynağından olan uzaklığı ise 175 kilometredir. Burada Nehir suyunun kirlilik yoğunluğu Beşdeğirmen istasyonu ile benzer özelliktedir yani bir miktar renk ve koku gözlenmektedir. Bu istasyondan önce Kütahya halk sulamalarından dönen tarımsal sular yoğun olarak Porsuk nehrine geri dönmektedir. Porsuk Barajı girişi istasyonunu etkileyen bazı önemli kirlenici kaynakları Tablo 5.3.'de verilmiştir. Porsuk Barajı girişi istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, kation değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-

ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

Tablo 5.1. Çalca istasyonundan önce yer alan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları (DSİ).

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirletici Kaynakları
60	Çiftliközü Deresi
65	Murat Çayı
85	Porsuk Deresi
90	Kureyşler Deresi
110	Porsuk Kaynakları
120	Çatdere, Değirmendere, Kütahya Halk Sulamalarından geri dönen tarımsal sular
135	Mezbaha ASAT
140	Felent Çayı (Elit Mermer)
145	Akdemir Tekst+Güral Porselen+Besler Süt Seyitömer Linyit İşletmeleri (SLİ); Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) Bölge Müdürlüğü; Etibank Emet Kolemanit İşletmesi Müessesesi; Etibank 100. Yıl Gümüş Madeni İşletmesi Müdürlüğü; Kütahya Şeker Fabrikası; TÜGSAŞ Azot Fabrikası;
150	Kütahya Manyezit Anonim Şirketi (KÜMAŞ)
155	Kütahya Porselen Sanayi; Kütahya Ambalaj Sanayi

Tablo 5.2. Çalca ile Beşdeğirmen istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları (DSİ)

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirletici Kaynakları
	Altın Çini Heriş Seramik ve Turizm Sanayii A.Ş. Kütahya Porselen A.Ş.
160	Kütahya Organize Sanayi Bölgesi
165	Seyitömer Termik Santrali

Tablo 5.3. Beşdeğirmen- Porsuk Barajı Girişi istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve Porsuk kaynağına olan uzaklıkları.

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirletici Kaynakları
170	Kütahya Halk Sulamalarından geri dönen tarımsal sular
175	Sabuncupınar Beldesi, Armutlu, İnli, Sökmen ve İncik

#### 5.1.4. Porsuk Barajı Çıkışı

Porsuk Barajı Gölü uzunluğu yaklaşık olarak 10 kilometredir. Porsuk kaynağından olan uzaklığı 180 kilometredir. Baraja gelen kirlenmiş sedimentlerin çoğu baraj gölü haznesinde çökelmektedir. Ayrıca su içerisindeki mineral ve organik atıklar da göl tabanına çökerek sudaki kirlilik konsantrasyonu azalmaktadır. Nehir suyunda bir miktar bulanıklık ve koku gözlenmektedir. Bu istasyonların seçilmesindeki amaç, baraj girişi ve çıkışı arasında kirlilik değerlerinin ve sediment kalitesinin izlenmesidir. Porsuk Barajı çıkışından alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, kation değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

#### 5.1.5. Vişnelik

Eskişehir İlinin 1997 Genel Nüfus Sayımı sonuçlarına göre toplam nüfusu 660.843 kişidir. Kentten Porsuk nehrine yüzlerce atık deşarj edilmektedir. Bu istasyonda sediment örnekleri Vişnelik Mahallesiinde bulunan Kanlıkavak Parkından alınmıştır. Porsuk kaynağından olan uzaklığı 230 kilometredir. Vişnelik istasyonu ile örnek alınan bir önceki Porsuk Barajı Çıkışı arasındaki uzaklık yaklaşık 45 km'dir. Porsuk nehri Eskişehir öncesi ve Eskişehir girişinde bir miktar daha kirlenmektedir. Bu nedenle buradaki nehir suyunda bir miktar bulanıklık ve koku

gözlenmektedir.

Vişnelik istasyonunu etkileyen bazı önemli kirlenici kaynakları Tablo 5.4.'de verilmiştir. Vişnelik istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, katyon değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

Tablo 5.4. Porsuk Barajı Çıkışı-Vişnelik istasyonu arasında kalan kirlenici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirlenici Kaynakları
195	Sabuncupınar Deresi
200	Uluçayır Deresi
215	Eşenkara
225	Benzinlik
230	Sarar (Sümerbank) Basma Fabrikası, Vişnelik Kanlıkavak öncesi deşarjlar

### 5.1.6. Tabakhane

Tabakhane istasyonunda örnekler Tabakhane Köprüsünden sonra alınmıştır. Tabakhane istasyonu ile örnek alınan bir önceki Vişnelik istasyonu arasındaki uzaklık yaklaşık 5 km'dir. Porsuk kaynağından olan uzaklığı 242 kilometredir. Eskişehir Şehir merkezinden birçok kirlilik deşarj edilmektedir. Tabakhane istasyonunu etkileyen bazı önemli kirlenici kaynakları Tablo 5.5.'de verilmiştir. Vişnelik istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, katyon değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım

analizleri (XRD) yapılmıştır.

Tablo 5.5. Vişnelik-Tabakhane istasyonu arasında kalan kirletici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirletici Kaynakları
230	TÜLOMSAŞ, Şehir Evsel Atıklar, Porsuk Kanallarından gelen deşarj suları
235	Sarısu Deresi, Ford Otomotiv Sanayi

### 5.1.7. Eskişehir Şeker Fabrikası Sonrası

Eskişehir Şeker Fabrikasının Porsuk kaynağından olan uzaklığı 245 km'dir ve fabrika atıkları Porsuk Nehri kirliliğini büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu atıklar özellikle balıkları doğrudan öldürmektedir. Bu istasyonu etkileyen bir diğer kirlilik kaynağı da bu bölgedeki şehir kanalizasyon deşarjlarıdır. Bu nedenle örnek alınan istasyonda kirliliğin tekrar yoğunlaştığı gözlenmektedir. Eskişehir Şeker Fabrikası istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, katyon değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

### 5.1.8. Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisi Sonrası

Eskişehir atıksu arıtma tesisi Alpu Yolu 3. Kilometrede bulunmaktadır. Porsuk kaynağından olan uzaklığı 255 kilometredir. Arıtma tesisinin mevcut kapasitesi Eskişehir nüfusunun %80'idir. Dolayısıyla şehrin atıksu miktarının %20 si doğrudan nehre deşarj edilmektedir. Ancak birçok nedenden dolayı arıtma tesisi düzenli olarak çalışmadığından bu oran çok daha yüksek olarak tahmin edilebilir.

Eskişehir atıksu arıtma tesisi istasyonunu etkileyen bazı önemli kirlenici kaynakları Tablo 5.5.'de verilmiştir. Eskişehir atıksu arıtma tesisi istasyonundan alınan sediment örnekleri üzerinde sırasıyla, su muhtevası, katı madde, su içeriği, uçucu madde, sabit madde, katyon değişim kapasitesi, elektriksel iletkenlik, pH, organik madde, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, birleşik zemin sınıflandırma sistemi, ağır metaller, taramalı elektron fotoğrafı (SEM), X-ışınları kırınım analizleri (XRD) yapılmıştır.

Tablo 5.6. Şeker Fabrikası ile atıksu arıtma tesisi arasında kalan kirlenici kaynakları ve porsuk kaynağına olan uzaklıkları.

Porsuk Kaynağından olan Uzaklık (km)	Bazı Önemli Kirlenici Kaynakları
250	Mezbaha atıkları, Oranize sanayi bölgesi deşarjı
255	Atıksu Arıtma Tesisi deşarjı

## 5.2. Geoteknik özellikler

### 5.2.1. Su muhtevası, Katı Madde İçeriği, Su İçeriği, Uçucu Madde, Sabit Madde

Su ağırlığının dane ağırlığına oranı olarak tanımlanan (doğal) su muhtevası, kirlenmiş bölgelerde oldukça yüksek seviyelerdedir. Bunun en büyük nedeni ise, sediment içerisinde çürümüş bulunan ve su tutma kapasitesi yüksek olan bitki ve hayvan kökenli organik atıkların varlığıdır.

Tablo 5.7. ve Tablo 5.8'de görüldüğü gibi, Porsuk sedimentlerinin su muhtevası %100 ile %500 arasında değişkenlik göstermektedir. Katı madde içeriği ise %20 ile %50 arasında değişkenlik göstermektedir. 550°C yakılması durumunda ise uçucu madde miktarı (kayıp miktarı) genellikle %10 ile %25 arasında değişmektedir. Bu değişkenliğin literatür çalışmalarında rastlanıldığı gibi, organik kökenli maddelerin sediment içinde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek su

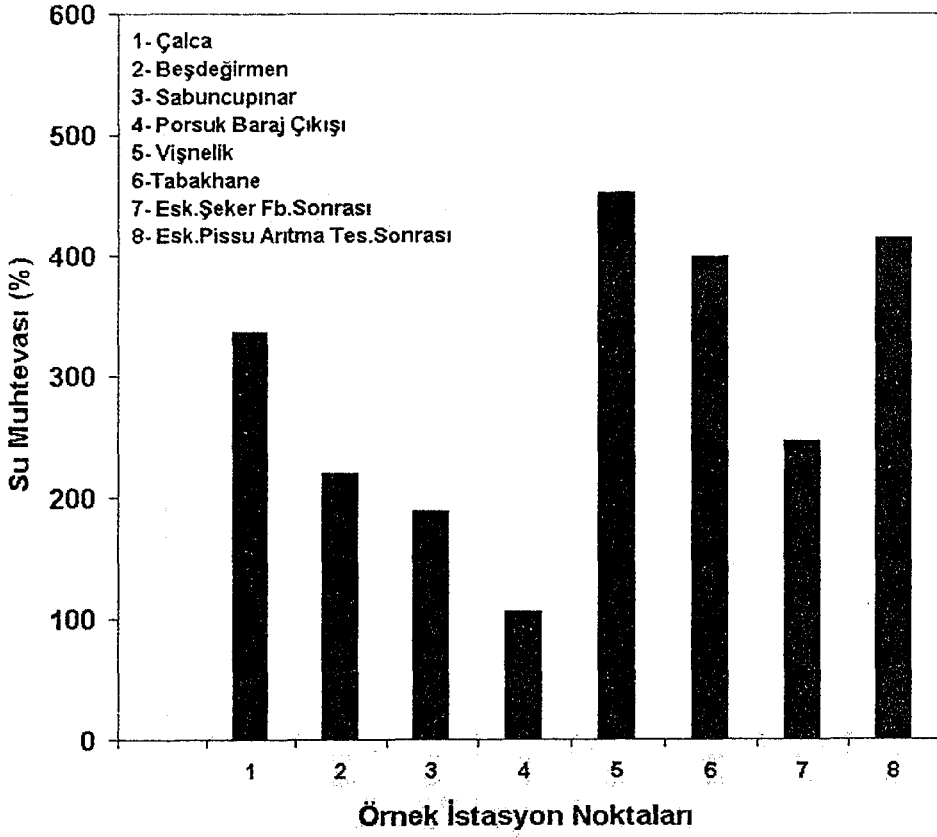
muhtevası değerlerinin elde edilmesinin nedeni organik kökenli maddelerdir. Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Sedimentlere ait Su Muhtevaları, Toplam Katı Madde ve Toplam Su İçeriği

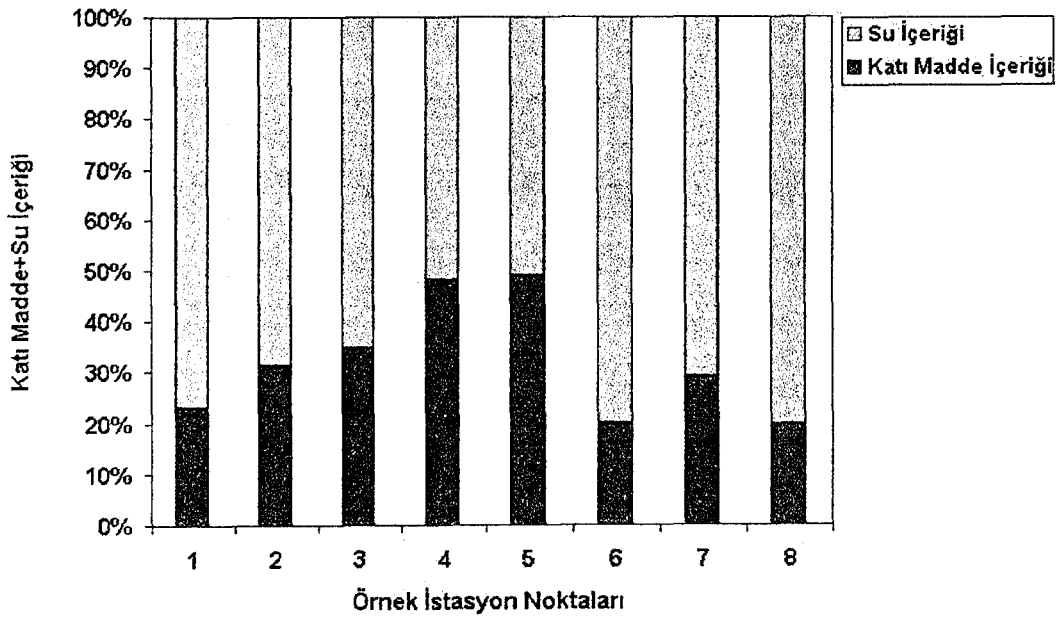
İstasyon	Su muhtevası (%)	105°C Sonunda	
		Katı Madde İçeriği (%)	Su İçeriği (%)
1- Çalca	336	22,9	77,1
2- Beşdeğirmen	220	31,3	68,7
3- Sabuncupınar	189	34,6	65,4
4- Porsuk Baraj Çıkışı	105	48,1	51,9
5- Vişnelik	453	48,8	51,2
6-Tabakhane	399	20,0	80,0
7- Esk.Şeker Fb.Sonrası	246	28,9	71,1
8- Esk.Pissu Arıtma Tes.Sonrası	414	19,5	80,5

Tablo 5.8. Sedimentlere ait Toplam Uçucu Madde ve Toplam Sabit Madde İçeriği

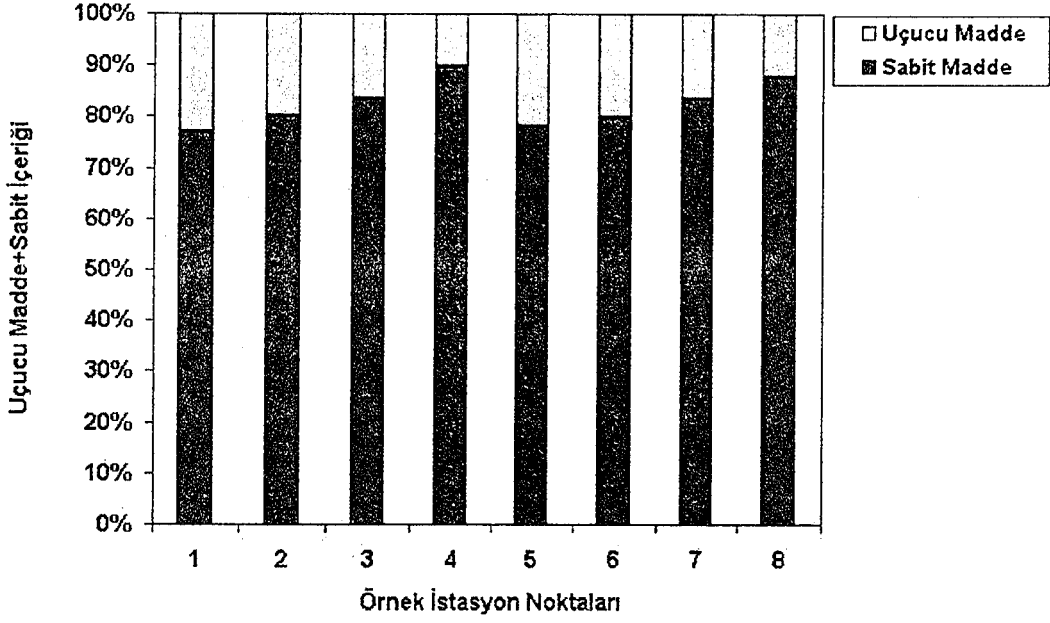
İstasyon	550°C Sonunda	
	Uçucu Madde (%)	Sabit Madde (%)
1- Çalca	23,1	76,9
2- Beşdeğirmen	19,8	80,2
3- Sabuncupınar	16,4	83,6
4- Porsuk Baraj Çıkışı	10,3	89,7
5- Vişnelik	21,8	78,2
6-Tabakhane	20,2	79,8
7- Esk.Şeker Fb.Sonrası	16,6	83,4
8- Esk.Pissu Arıtma Tes.Sonrası	12,2	87,8



Şekil 5.1.Sedimentlerin su muhtevası dağılımları



Şekil 5.2.Sedimentlerin katı madde ve su içeriği dağılımları



Şekil 5.3.Sedimentlerin uçucu madde ve sabit madde dağılımları

### 5.2.2. Sedimentlerin Dane Çapı Dağılımı, Dane Özgül Ağırlıkları

Sedimentlerin fiziksel özellikleri hakkında fikir veren birim hacim ağırlığı ile dane özgül ağırlığı laboratuvarlarda belirlenebilmektedir. Özgül ağırlık, zeminin katı parçacıklarının birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak adlandırılır ve sedimenti oluşturan katı parçacıkların ağırlığı olarak tanımlanabilir .

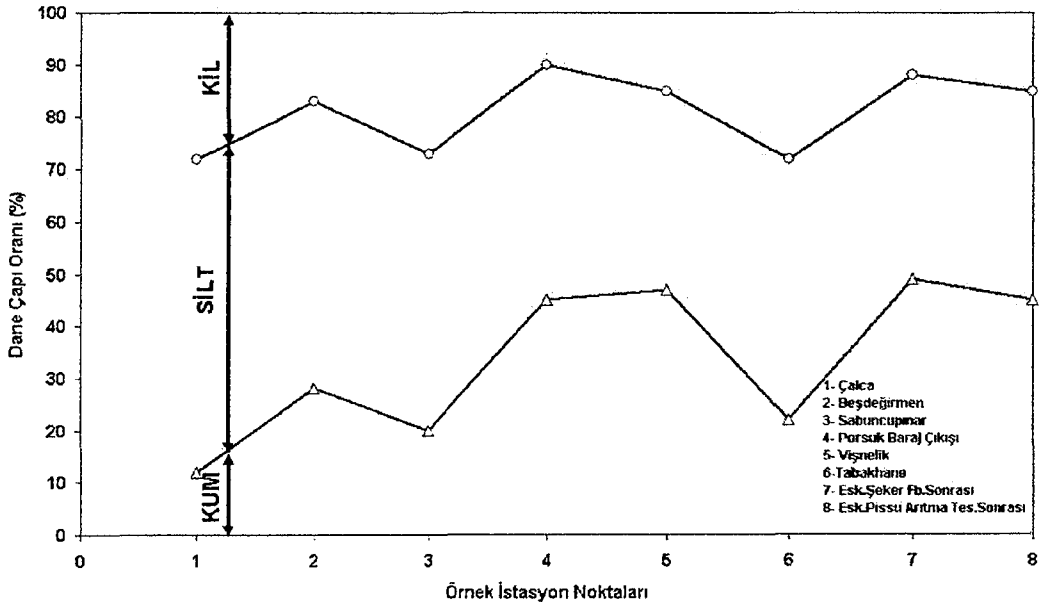
Dane çapı, mühendislik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. İyi bir dane çapı dağılımına (granülometrisine) sahip bir zemin veya sediment, yüksek bir kuru birim ağırlığı gösterir. Bu ise mukavemet, permeabilite gibi mühendislik özelliklerinin iyi olduğunu göstermektedir.

Dane çapı dağılımını incelediğimizde Çalca istasyonundan alınan örneğin silt ve kil cinsi bir sediment olduğu görülmektedir. Beşdeğirmen istasyonunda ise kum ve silt ağırlıklı olduğu görülmüştür. Porsuk Barajı girişi-Sabuncupınar istasyonunda ise silt ve kil oranı daha yüksektir. Porsuk Barajı çıkışından ve vişnelik istasyonlarından alınan sediment örnekleri kum ve silt içermektedir.

Tabakhane istasyonunda sil ve kil ağırlıklı, Şeker Fabrikası ve Artıma tesisi sonrasında kim ve silt ağırlıklı olarak belirlenmiştir (Tablo 5.9). Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.9. Sedimentlere ait Atterberg Kıvam Limitleri, Dane Çapı Dağılımı, Grup Sembolü ve Sınıflandırılması

İstasyon Numarası	Atterberg Limitleri			Sınıfı	Dane Özgül Ağırlığı	Dane Çapı Dağılımı		
	LL	PL	Ip			UCS	Kum	Silt
1- Çalca	65	57	18	OH	2,31	12	60	28
2- Beşdeğirmen	76	31	35	OH	2,34	28	55	17
3- Porsuk Baraj Girişi- Sabuncupınar	58	41	17	OH	2,29	20	53	27
4- Porsuk Barajı Çıkışı	68	53	15	OH	2,34	45	45	10
5- Vişnelik	52	41	11	OH	2,14	47	38	15
6-Tabakhane	65	41	24	OH	2,27	22	50	28
7- E.Şeker Fabrikası Sonrası	61	35	26	OH	2,42	49	39	12
8- E.Atıksu Artıma Tesisi Sonrası	53	45	8	OH	2,29	45	40	15

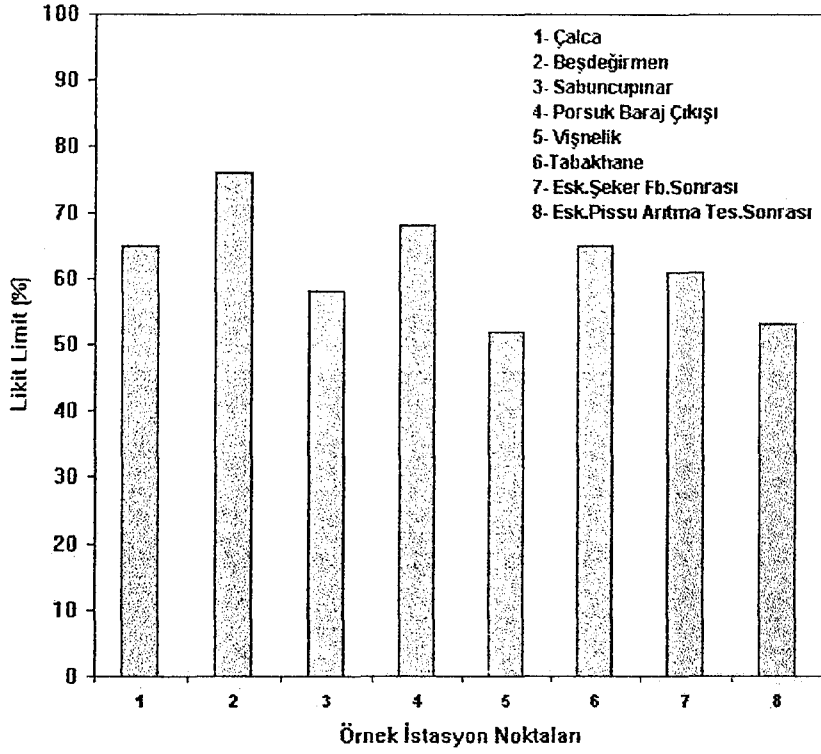


Şekil 5.4.Sedimentlerin dane çapı dağılımları

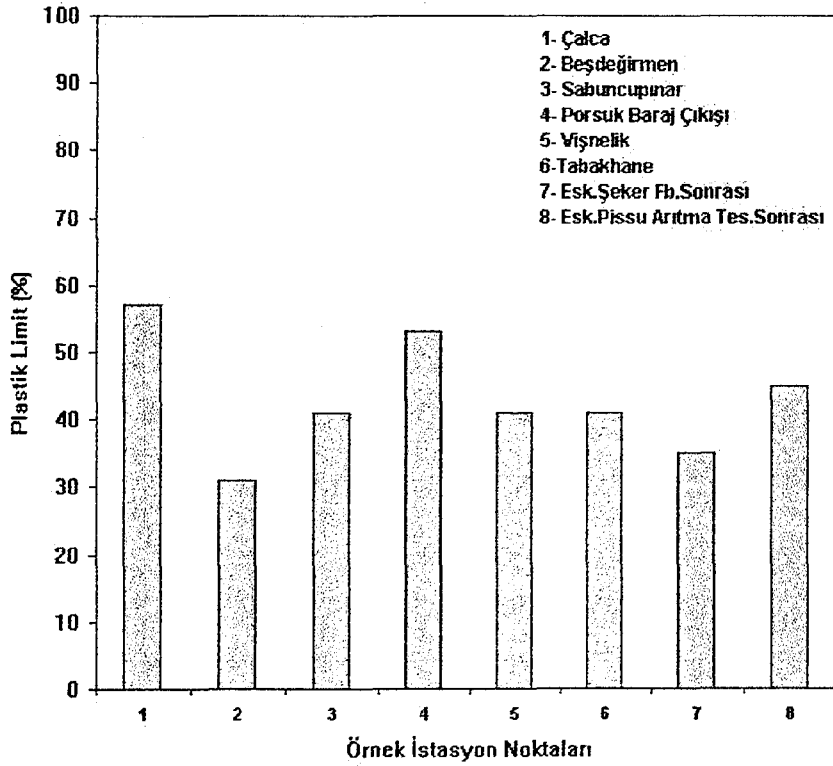
### 5.2.3. Sedimentlerin Sınıflandırılması ve Atterberg Kıvam Limitleri

Genel olarak, zeminlerin veya sedimentlerin sınıflandırılması sonucunda, permeabilite (geçirimsizlik), mukavemet, birim hacim ağırlığı gibi özellikler hakkında bilgi belirlenebilir. Zeminler veya sedimentler yağmur ya da başka bir şekilde suya maruz kaldıklarında boşluklar tamamen su ile dolarak suya-doygun bir yapı meydana gelmekte ve boşluklarda hava kalmamaktadır. Öte yandan aynı zemin veya sediment kurak bir mevsimde boşluklarında bulunan suların buharlaşması ile tamamen kuru hale gelebilmektedir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için kıvam limitlerinin belirlenmesi gereklidir. Ayrıca kıvam limitlerinin belirlenmesi sonucunda mekanik özelliklerin birçoğu belirlenebilir. Örneğin, likit limitin yüksek olması sıkışabilirliğin yüksek olduğunu göstermektedir (Aytekin, 2000, Toğrol ve diğerleri 1986).

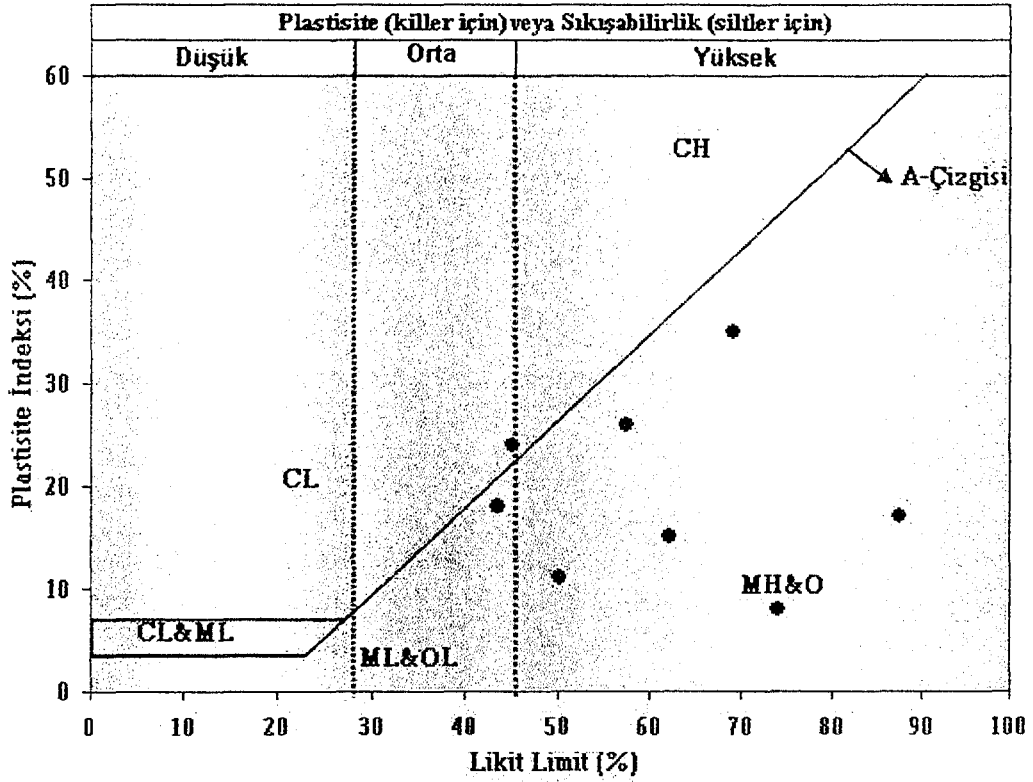
Porsuk nehrinden alınan sedimentlerinin plastisite indisi orta plastisite grubunda,  $I_p=10-25\%$ ,  $w_L=30-50\%$ , yoğunlaşmaktadır. Porsuk sedimentlerinin likit limitleri %45-85 arasında değişirken plastik limit değerleri %35-60 arasında bulunmuştur (Tablo 5.9). Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 verilmiştir. Ayrıca sedimentlerin plastisite kartındaki yerleri ve kil mineralleri ile ilişkisi Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.



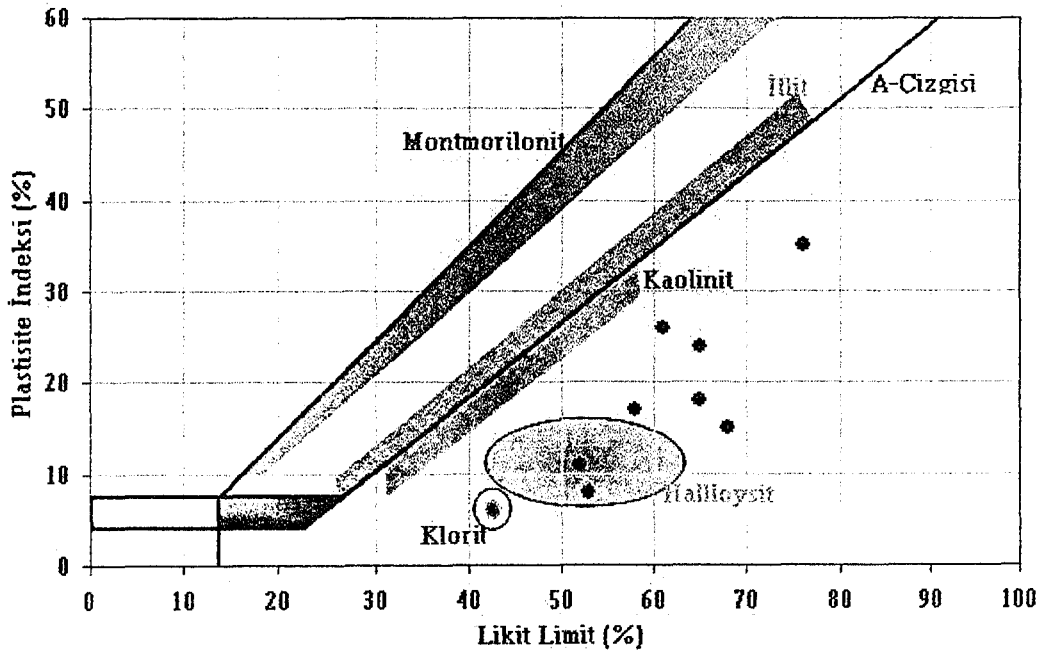
Şekil 5.5.Sedimentlerin likit limit dağılımları



Şekil 5.6.Sedimentlerin plastik limit dağılımları



Şekil 5.7.Sedimentlerin plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.8.Sedimentler ile kil mineralleri arasındaki ilişki (Casagrande, 1948)

### 5.3. Fiziko-kimyasal özellikler

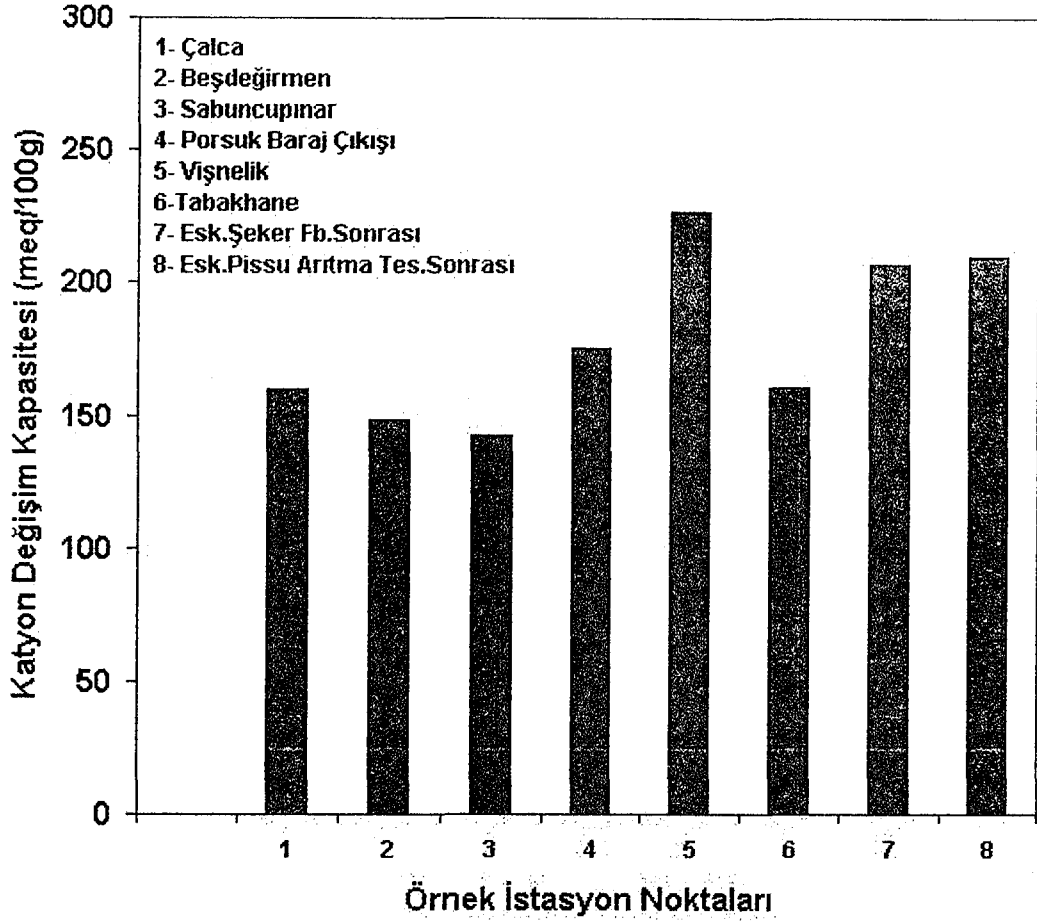
#### 5.3.1. Sedimentlerin Katyon Değişim Kapasitesi

Katyon değişim kapasitesi (KDK), özellikle metal katyonları gibi bazı kirleticilerin uzaklaştırılması veya adsorbe edilebilmesi için önemlidir. Ortam içerisinde değişebilir katyonların miktarını belirtir. Katyon değişim kapasitesi ne kadar büyük ise, kirletici katyonların ortamda bulunabilme derecesi o kadar yüksek olmaktadır. Bir başka deyişle katyon değişimi ile kirleticiler diğer mineraller tarafından adsorbe edilmektedir. Bu şekilde kirleticiler farklı mineraller tarafından tutulmakta ve ortamdan uzaklaştırılabilmektedir.

Deney sonuçlarından da görülebileceği gibi, sedimentlerin katyon değişim kapasiteleri 150 meq/100g ile 200 meq/100g arasında değişkenlik göstermektedir (Tablo 5.10). Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.10. Sedimentlere ait bazı kimyasal analizlerin sonuçları

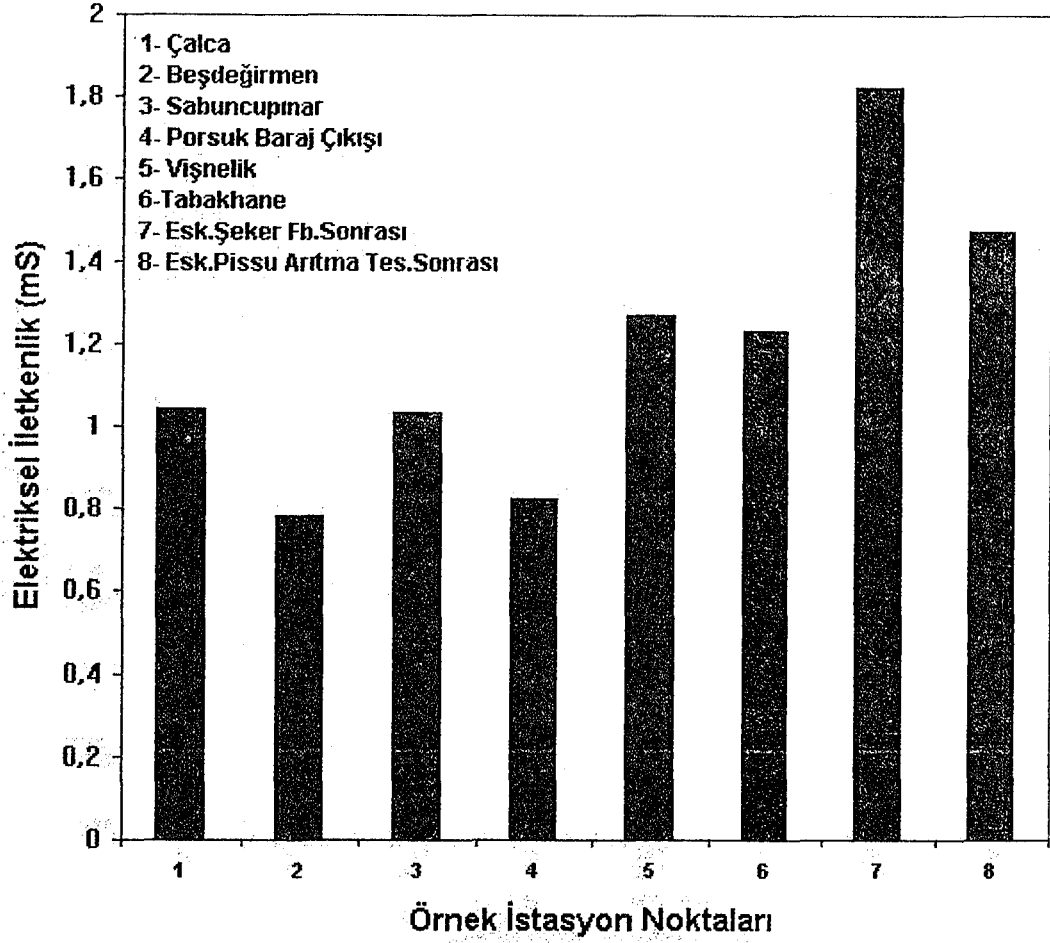
İstasyon Numarası	Katyon Değişim Kapasitesi	pH	Elektriksel İletkenlik	Organik Madde
	meq/100g	-	mS/cm	%
1- Çalca	160	8,88	1.044	9.14
2- Beşdeğirmen	148	8,75	0.781	6.89
3- Porsuk Baraj Girişi- Sabuncupınar	142	8,44	1.032	3.45
4- Porsuk Barajı Çıkışı	175	8,03	0.826	5.46
5- Vişnelik	227	9,33	1.272	2.67
6-Tabakhane	161	8,98	1.234	3.28
7- E.Şeker Fabrikası Sonrası	207	8,62	1.827	2.56
8- E.Atıksu Arıtma Tesisi Sonrası	210	7,46	1.475	3.87



Şekil 5.9.Sedimentlerin katyon değişim kapasitesi dağılımları

### 5.3.2. Sedimentlerin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Elektriksel iletkenlik kapasitesinin belirlenmesi ile ortamdaki (sediment dane yüzeyi ile su/sıvı arasında) iyon tipi ve sayısını vermektedir. Elektriksel iletkenlik, laboratuarda kimyasal olarak tayin edilen anyonlar ve katyonların toplamına eşittir. Ortamın iyon tipi ve sayısı ile elektriksel iletkenlik arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. İyon tipine ve sayısına bağlı olarak elektriksel iletkenlik artar. Elektriksel iletkenlik, zeminlerin tuzluluk değeri için de kullanılmaktadır. Dency sonuçlarında ortamın elektriksel iletkenliğinin 0,4 mS/cm ile 2,0 mS/cm arasında değiştiği görülmüştür (Tablo 5.10). Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10.Sedimentlerin elektriksel iletkenlik dağılımları

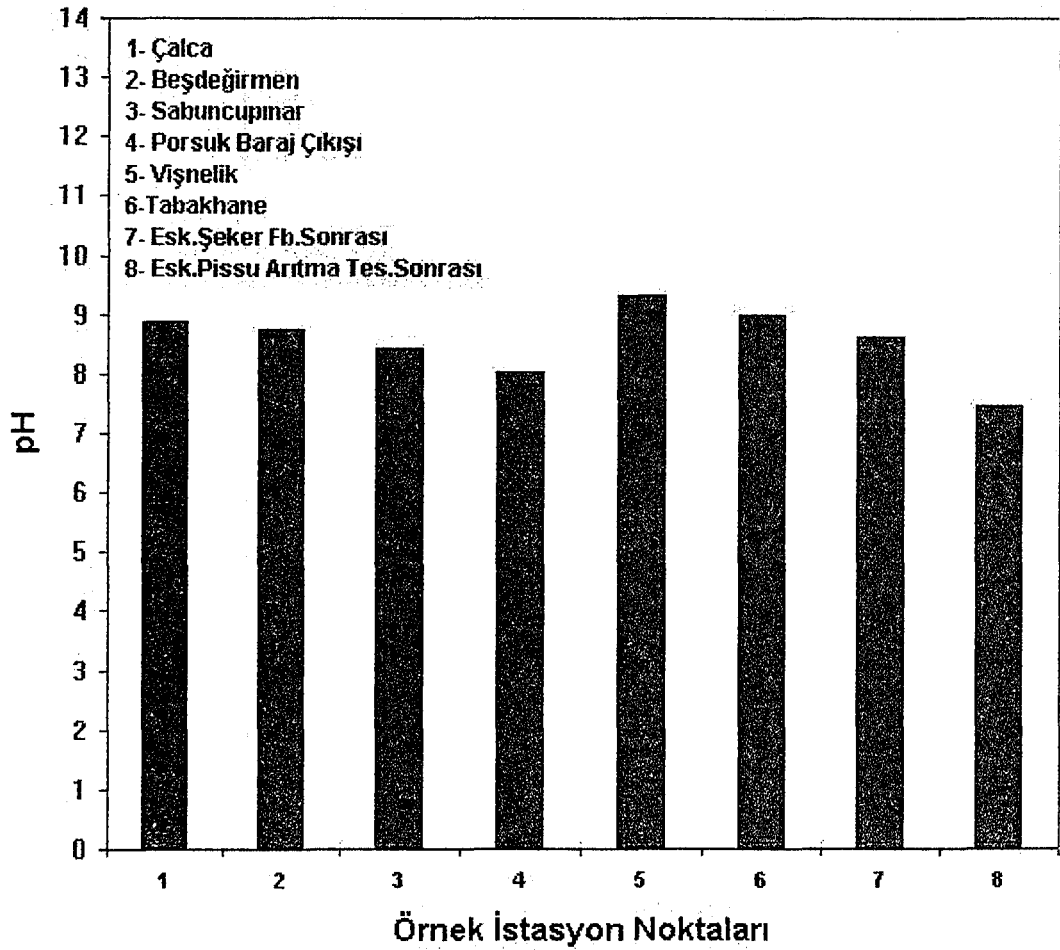
### 5.3.3.Sedimentlerin pH, Organik Madde Miktarları

pH ağır metalleri absorbe etme karakteristiği açısından önemli bir göstergedir. pH değeri büyük olan ortamlarda metal katyonlar yüzeylerde daha çok tutulmaktadır. Bu durumda ortamda bulunabilecek değişebilir katyonlar azalır.  $pH > 6.5$  ise ortamın metalleri azalır,  $pH < 5$  ise ortamın metalleri artar. Asidik ortamlarda ortamda elektron verme eğiliminin yüksek olduğu, bazik ortamlarda ise elektron verme eğiliminin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Diğer bir deyişle ortamda elektron veren iyonlar daha fazla bulunacaktır. Metallerin elektron verme eğilimi daha yüksek olduğundan ortamda metal iyonları daha fazla bulunacaktır.

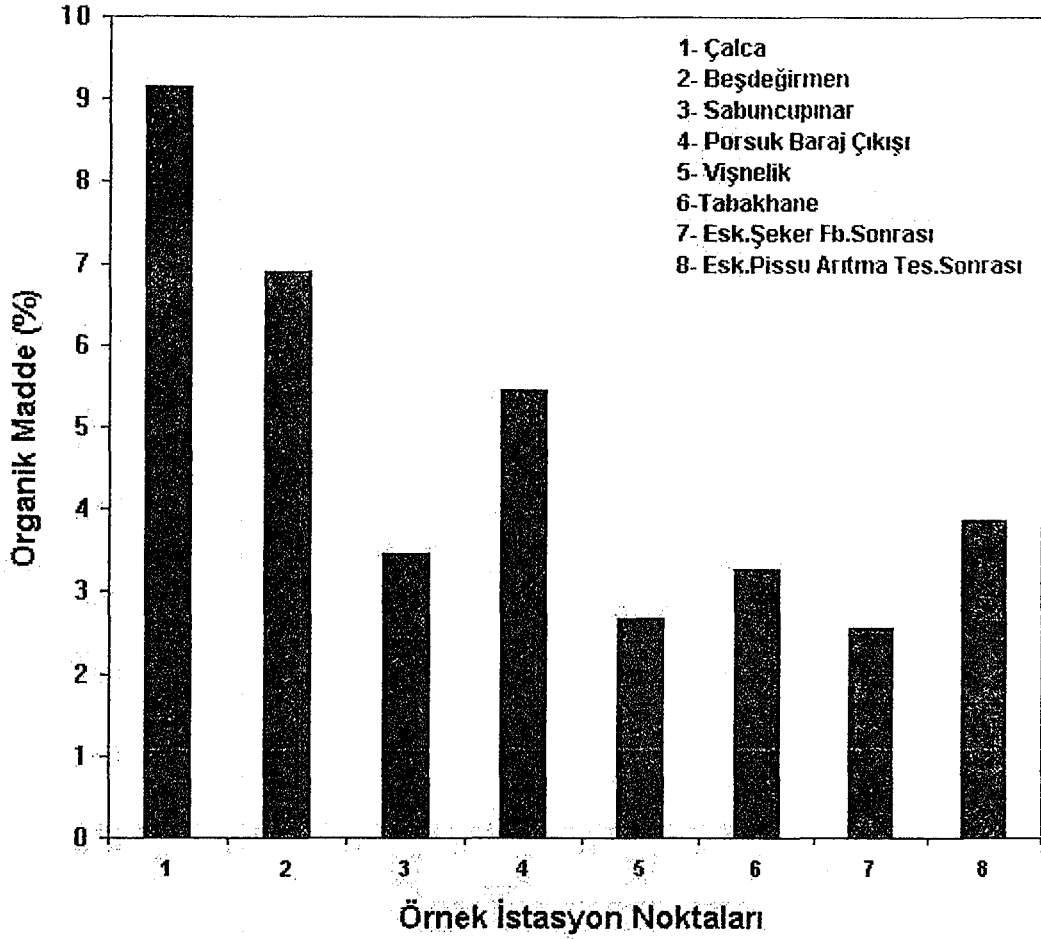
Dency sonuçlarının gösterdiği gibi ortam bazik özellikte göstermektedir. Bu durumda ise metal miktarının da az olduğunu göstermektedir.

Organik madde miktarı potasyum dikromat (1 N  $K_2Cr_2O_7$ ) yöntemine göre yapılmıştır. Sedimentlerin azot analizleri için Kjeldahl Yöntemi kullanılmış ve azot okumaları için Kjeltec-1030 aleti kullanılmıştır.

Organik madde miktarlarının ise Çalca istasyonunda diğer istasyonlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 5.10). Tablo değerlerinin grafik olarak gösterimi Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11.Sedimentlerin pH dağılımları



Şekil 5.12.Sedimentlerin organik madde dağılımları

#### 5.3.4. Sedimentlerin Toplam Metal Miktarı

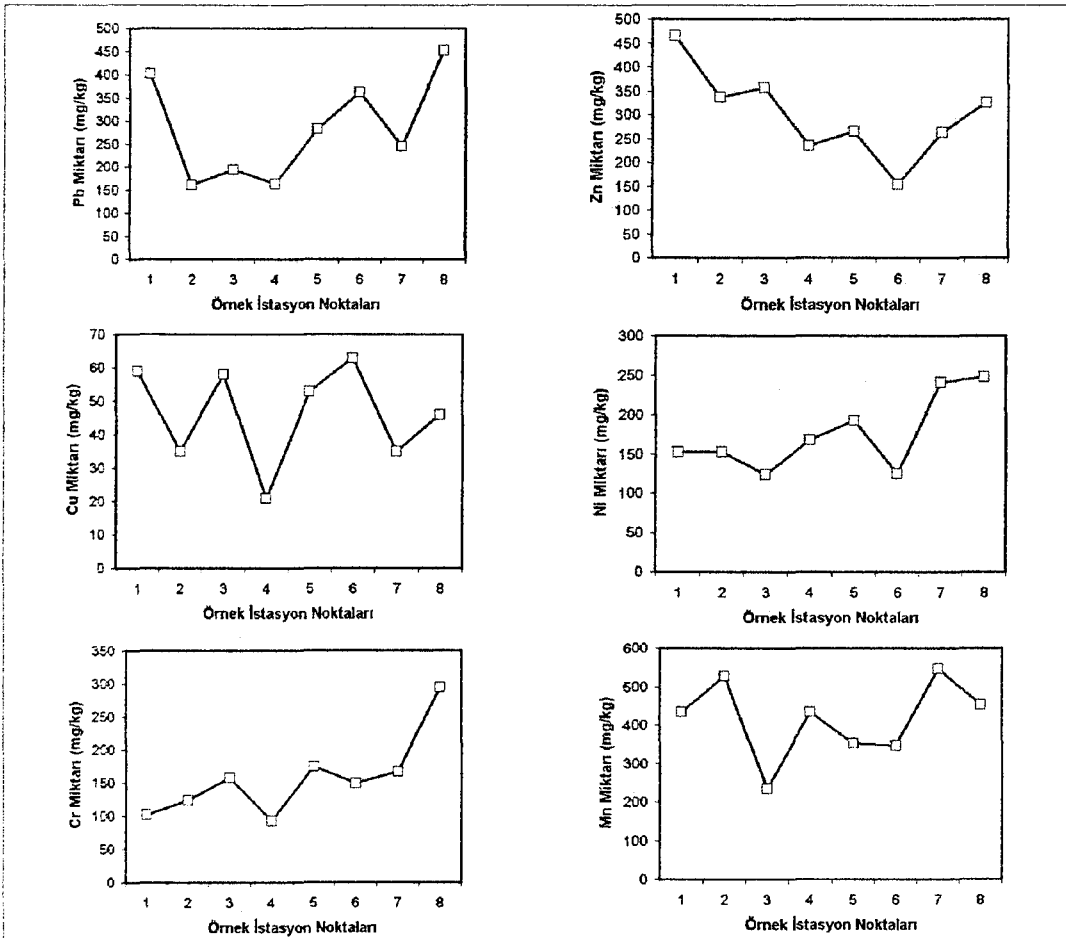
Yoğunluğu  $6 \text{ gr/cm}^3$  den büyük olan metaller ağır metal olarak adlandırılmaktadır. Sedimentlerde çözülmüş veya çözünmemiş halde bulunan metallerin toplamı, sedimentteki ağır metal miktarını vermektedir ve mg/kg-kuru madde olarak ifade edilmektedir.

Tablo 5.11’de verilen deney sonuçlarından görüldüğü gibi, Çalca en kirli istasyon olarak karşımıza çıkarken, nehir boyunca ilerlediğimizde metal miktarının azalma eğiliminde iken arıtma tesisi sonunda yeniden artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak arıtma tesisinin kapasitesinin yetersizliği nedeni ile son

istasyon olan atık su arıtma tesisi sonunda tekrar artış görülmektedir. Tablo değerlerinin grafik olarak toplu gösterimi Şekil 5.13'de verilmiştir.

Tablo 5.11. Sedimentlere ait toplam metal miktarları

İstasyon Numarası	Toplam Metal Miktarları-mg/kg						
	Pb	Zn	Cu	Ni	Cd	Cr	Mn
1- Çalca	402	465	59	152	0.01	102	435
2- Beşdeğirmen	160	336	35	152	0.01	123	527
3- Porsuk Baraj Girişi- Sabuncupınar	193	357	58	124	0.01	158	234
4- Porsuk Barajı Çıkışı	163	235	21	168	0.01	92	435
5- Vişnelik	282	265	53	192	0.01	175	353
6-Tabakhane	362	154	63	125	0.01	149	346
7- E.Şeker Fabrikası Sonrası	244	263	35	241	0.01	167	546
8- E.Atıksu Arıtma Tesisi Sonrası	453	325	46	248	0.01	294	453

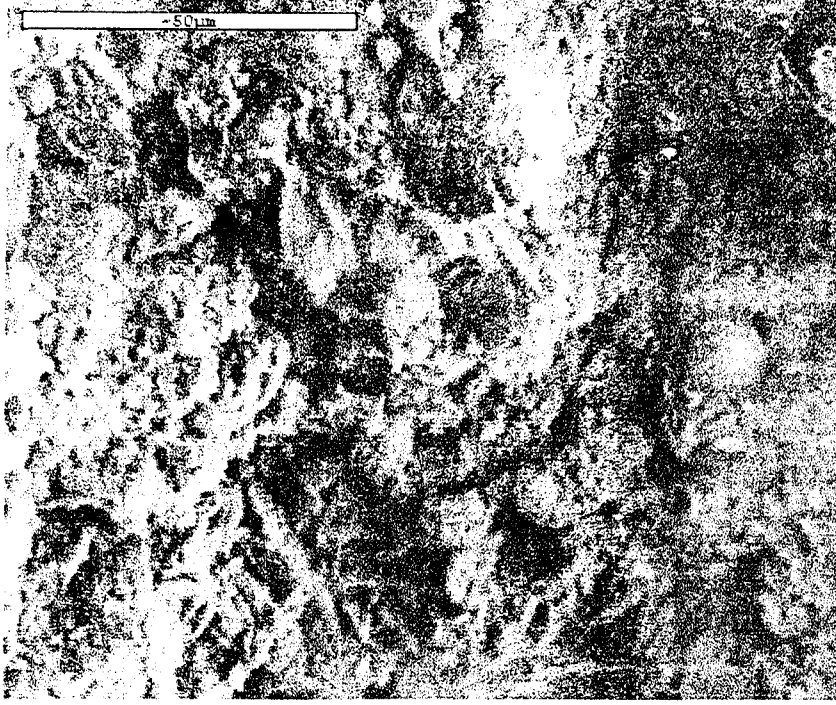


Şekil 5.13.Sedimentlerin toplam ağır metal dağılımları

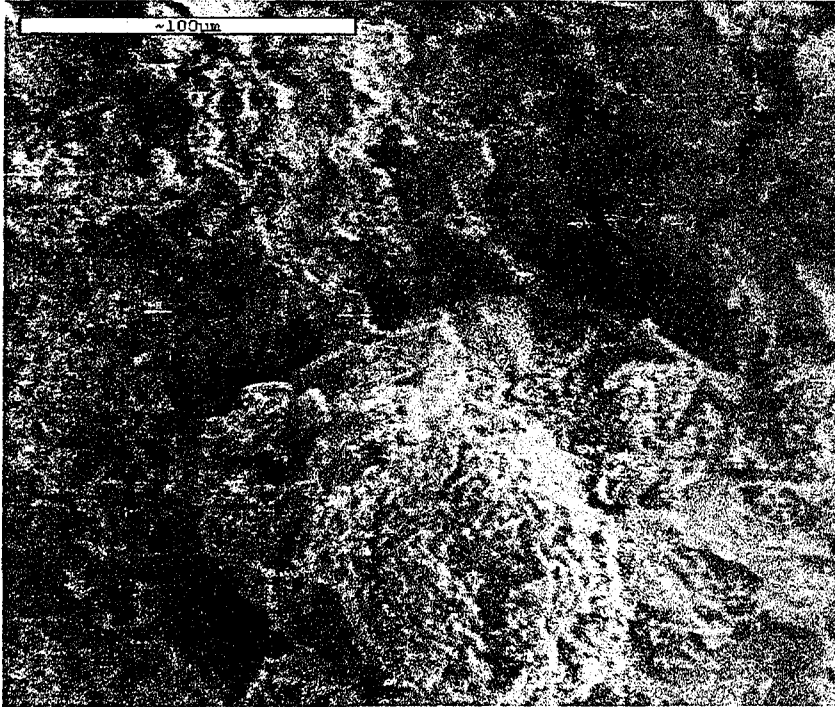
## 5.4 Mikro-yapısal Özellikler

### 5.4.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Fotoğrafları

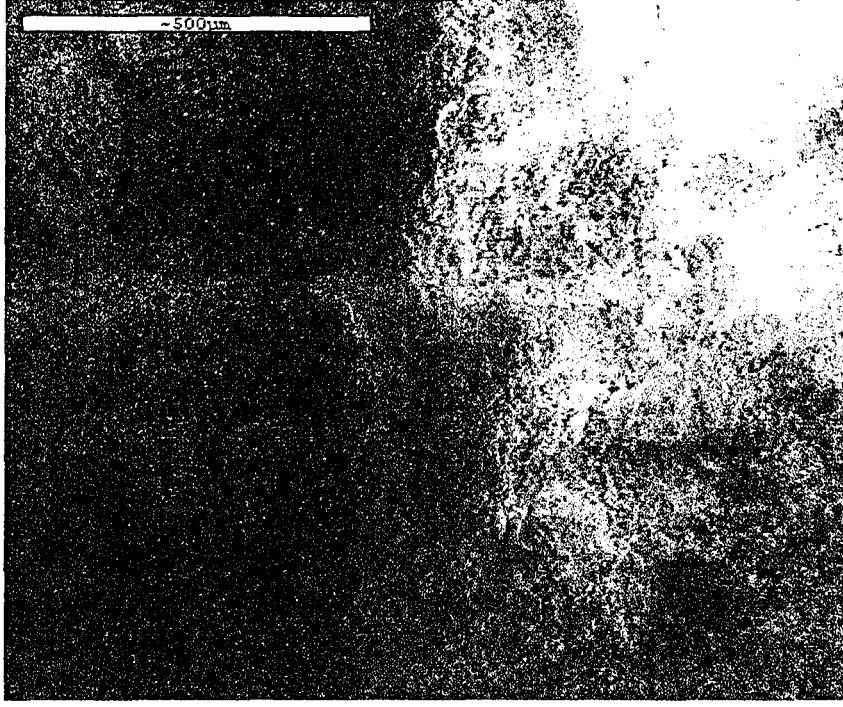
SEM, kil veya sedimentlerde mikro yapının gözlenmesi için ideal bir araçtır. Sedimentler, domainler, agregalar, aglomeralar, floklar ve organik bileşiklerden oluşmaktadır. Birden çok daneciğin oluşturduğu topaklanmalar (domainler veya cardhouse) birçok farklı yapısal özellik sergilemektedir. Kenar-kenar veya yüz-yüze yapışan daneler olabildiği gibi kenar-yüz veya kiremit tipi (shingle) yapılar (domainler) sıklıkla rastlanmaktadır. Sediment daneciklerinin mikro ve makro yapı oluşumunu etkileyen elektrokimyasal, termo-mekanik ve benzerleri gibi fiziko-kimyasal kuvvetler bulunmaktadır. Bunlardan başka, bio-mekanik, bio-fizik ve bio-kimyasal işlemler gibi bio-organik kuvvetler vardır. Bunlar da sedimentlerin içinde bulunan mikroorganizmaların sayısına bağlı olarak, mikro ve makro yapı üzerinde belirleyici rol oynamaktadırlar. Porsuk sedimentlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğraflarından bazıları Resim 5.1 ile Resim 5.7 arasında gösterilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere, boşluk oranı oldukça yüksektir, gözenekli ve floküle bir yapıya sahiptirler. Bunun yanında sedimentlerde alg, diatom, filament gibi ilkel canlılara da rastlanmaktadır



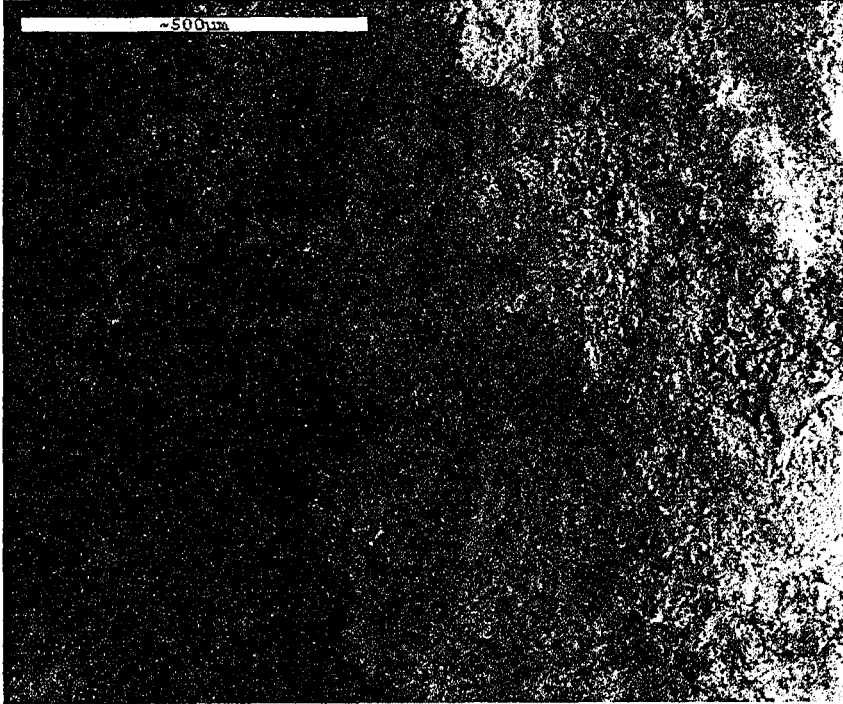
Resim 5.1. Çalca sedimentlerinin SEM fotoğrafı



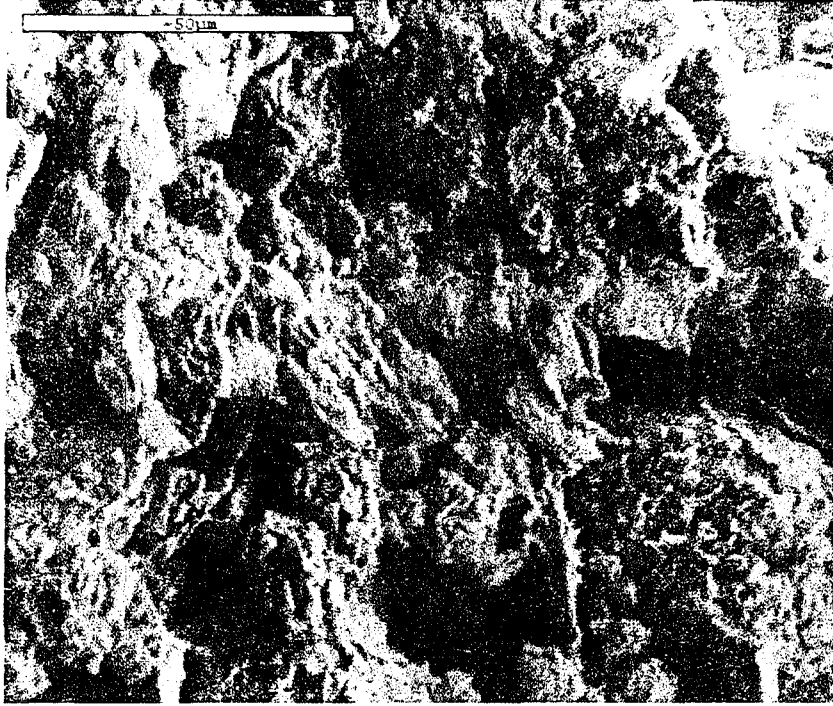
Resim 5.2. Beşdeğirmen sedimentlerinin SEM fotoğrafı



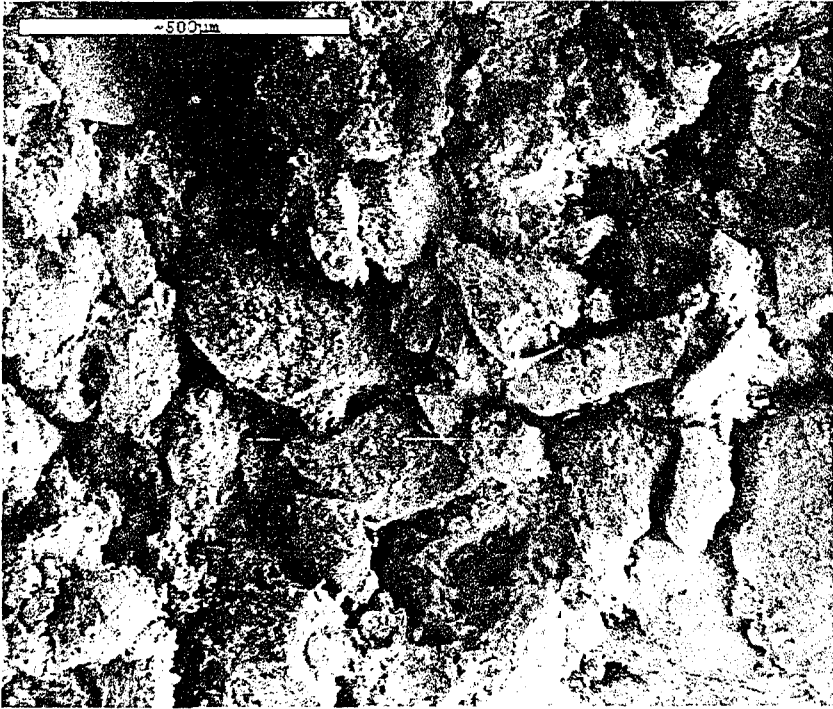
Resim 5.3. Porsuk Baraj Giriş sedimentlerinin SEM fotoğrafı



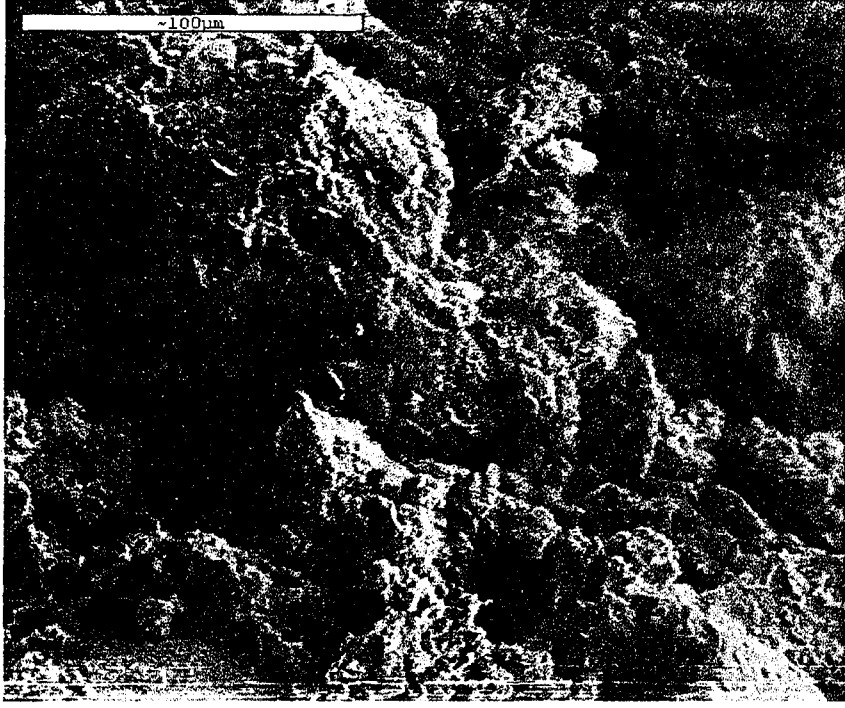
Resim 5.4. Porsuk Baraj Çıkışı sedimentlerinin SEM fotoğrafı



Resim 5.5. Vişnelik sedimentlerinin SEM fotoğrafı



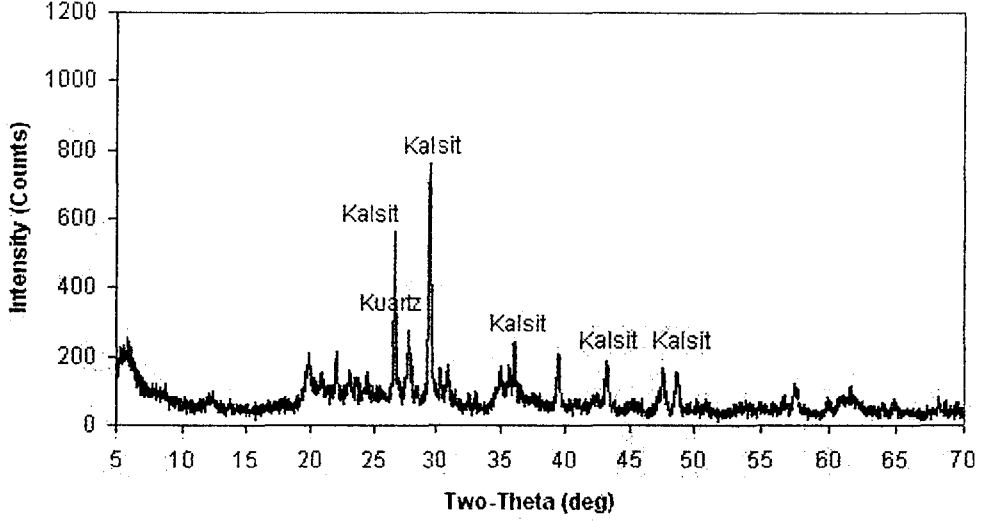
Resim 5.6. Tabakhane sedimentlerinin SEM fotoğrafı



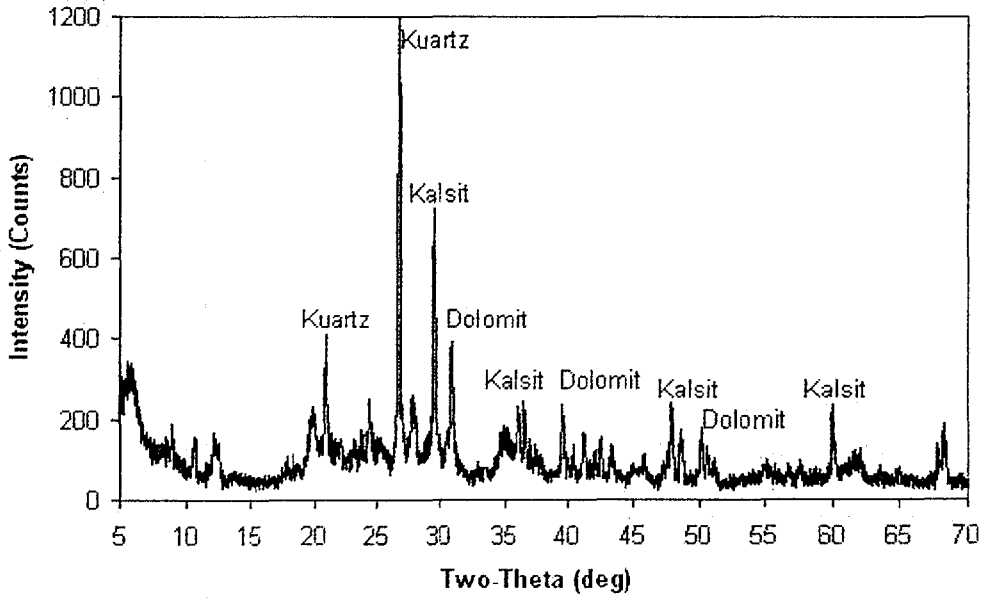
Resim 5.7. Arıtma tesisi sonrası sedimentlerinin SEM fotoğrafı

#### 5.4.2. X Işınları Kırınım Analizi (XRD)

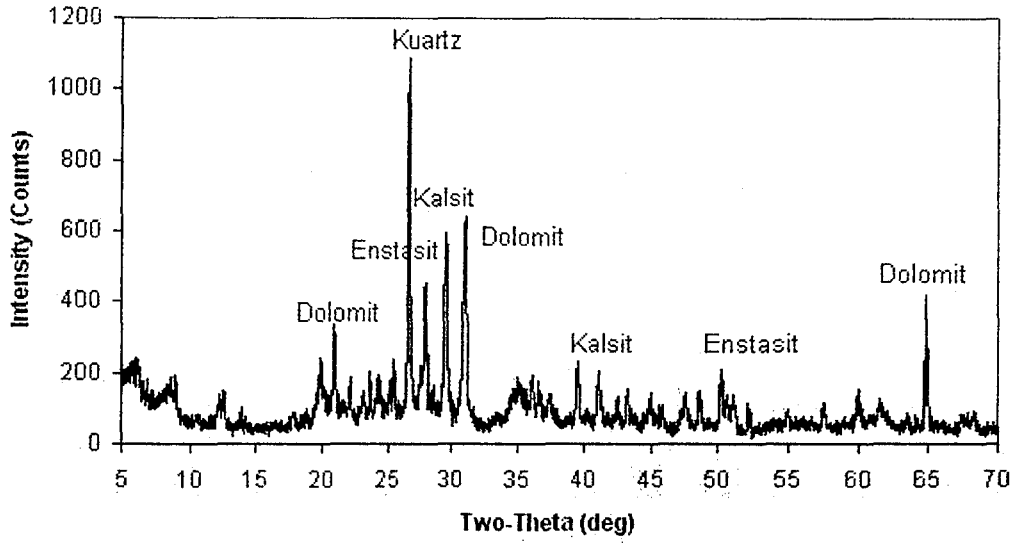
XRD yöntemi ile elde edilen grafikler Şekil 5.14 ile Şekil 5.20 arasında gösterilmiştir.



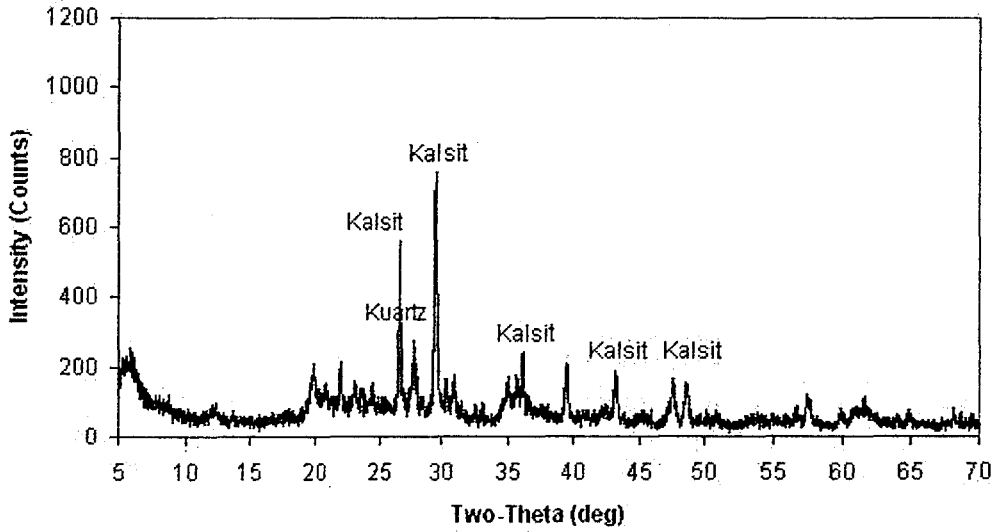
Şekil 5.14. Çalca sedimentlerinin XRD grafiği



Şekil 5.15. Beşdeğirmen sedimentlerinin XRD grafiği



Şekil 5.16. Porsuk Baraj Çıkışı sedimentlerinin XRD grafiği



Şekil 5.17. Vişnelik sedimentlerinin XRD grafiği

## 6. SEDİMENTLERİN İLAVE MALZEMELERLE STABİLİZASYONU

Kirlenmiş Çalca Sedimenti laboratuarda kurutulmuş ve 100 nolu elekten elenerek homojen bir duruma getirilmiştir. Bu toz sediment Tablo 6.1'de gösterildiği gibi, zeolit, sepiyolit, kireç, çimento ve uçucu kül ayrı ayrı ağırlıkça değişik oranlarda karıştırılmış ve su ile doymun hale getirilmiştir. Seçilen oranlar iyileştirme sonuçlarının gözlenebilmesi için yüksek seçilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında 3-4 gün beklenecek pozolanik reaksiyonlarını tamamlanması beklenmiştir. Bundan sonra bu iyileştirilmiş sedimentler etüvde tekrar kurutulmuş ve tekrar 100 nolu elekten elenmiştir. Bu numuneler üzerinde laboratuarda dane özgül ağırlığı, dane çapı dağılımı, kation değişim kapasitesi, pH, elektriksel iletkenlik, organik madde ve toplam metal miktarı deneyleri yapılmıştır.

Tablo 6.1. Sedimentlerin iyileştirilmesinde kullanılan karışımlar ve oranları

Karışım No	Oran
1	%100 Sediment
2	%100 Sediment+%50 Zeolit
3	%100 Sediment+%100 Zeolit
4	%100 Sediment+%50 Sepiyolit
5	%100 Sediment+%100 Sepiyolit
6	%100 Sediment+%50 Kireç
7	%100 Sediment+%100 Kireç
8	%100 Sediment+%50 Çimento
9	%100 Sediment+%100 Çimento
10	%100 Sediment+%50 Uçucu Kül
11	%100 Sediment+%100 Uçucu Kül

## 6.1. Geoteknik Özellikler

Labaratuvarında yapılan danc özgül ağırlığı ve dane çapı dağılımı deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.2'de gösterilmiştir. Dane özgül ağırlığı ilave malzemelerin kullanılması ile genelde azalmıştır. Bunun nedeni sepiyolit, kireç ve zeolit gibi düşük özgül ağırlığa ve yoğunluğa sahip hafif malzemelerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca pozolanik reaksiyonların meydana gelmesinden kaynaklanan topaklanmaların dane çaplarını arttırdığı görülmektedir. Buna göre sedimentin kil çapının azaldığı, malzemenin silt çapının arttığı gözlenmiştir. Bunun da sedimentin plastisitesini düşürmesi beklenmelidir.

Tablo 6.2. İyileştirilmiş sedimentlerin geoteknik özellikleri

No	Oran	Dane Özgül Ağırlığı	Dane Çapı Dağılımı		
			Kum	Silt	Kil
1	%100 Sediment	2.31	12	60	28
2	%100 Sediment+%50 Zeolit	2.13	11	66	23
3	%100 Sediment+%100 Zeolit	2.21	12	65	23
4	%100 Sediment+%50 Sepiyolit	2.01	10	67	23
5	%100 Sediment+%100 Sepiyolit	2.03	11	65	24
6	%100 Sediment+%50 Kireç	2.21	11	68	21
7	%100 Sediment+%100 Kireç	2.31	10	69	21
8	%100 Sediment+%50 Çimento	2.35	10	71	19
9	%100 Sediment+%100 Çimento	2.45	9	71	20
10	%100 Sediment+%50 Uçucu Kül	2.45	11	66	25
11	%100 Sediment+%100 Uçucu Kül	2.42	11	63	26

## 6.2. Fiziko-kimyasal özellikler

İyileştirilmiş sedimentler üzerinde katyon değişim kapasitesi, pH, elektriksel iletkenlik, potasyum dikromat yöntemine göre organik madde ve toplam metal miktarı deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylere ait sonuçlar Tablo 6.3'de gösterilmiştir. Sedimentlerin yüzey alanları azalmaktadır. Çünkü oluşan pozolanik reaksiyonlar

danelerin topraklanması sağlamaktadır. Bu nedenle iyileştirilmiş sedimentlerin katyon değişim kapasitesi azalmaktadır. Ayrıca ortamdaki elektriksel yük, yani kirlilik azalmaktadır. Bunun yanında organik madde miktarında da uçucu kül haricinde yüksek oranda azalma gözlenmiştir. Uçucu külün tek başına bağlayıcılık özelliği olmadığından beklenen iyileştirme özellikleri düşük olmaktadır. Tablo 6.4’de görüldüğü gibi, Toplam ağır metal miktarında da önemli azalma miktarları sağlanmıştır. Ancak Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğindeki sınır değerlerin altına inilememiştir. Bunun nedeni sedimentin yüksek organik madde içermesidir.

Tablo 6.3. İyileştirilmiş sedimentlerin Fiziko kimyasal özellikleri

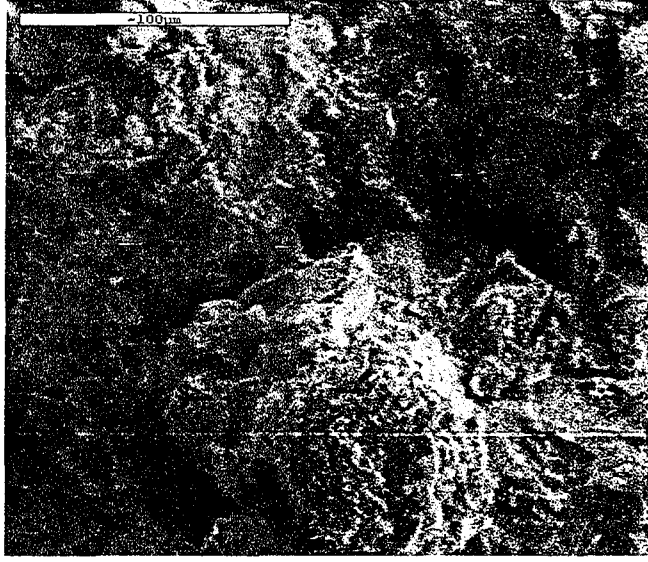
No	Oran	Katyon Değişim Kapasitesi (meq/100g)	pH	Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	Organik Madde (%)
1	%100 Sediment	160	8.88	1,044	9,14
2	%100 Sediment+%50 Zeolit	133	7.66	1,002	8,20
3	%100 Sediment+%100 Zeolit	142	7.87	1,032	7,21
4	%100 Sediment+%50 Sepiyolit	138	8.65	0,983	6,85
5	%100 Sediment+%100 Sepiyolit	110	8.15	0,950	6,66
6	%100 Sediment+%50 Kireç	128	9.67	1,029	5,67
7	%100 Sediment+%100 Kireç	99	10.22	1,024	5,75
8	%100 Sediment+%50 Çimento	152	9.38	0,987	9,23
9	%100 Sediment+%100 Çimento	89	9.95	1,023	9,01
10	%100 Sediment+%50 Uçucu Kül	142	7.08	0,991	8,98
11	%100 Sediment+%100 Uçucu Kül	147	7.54	1,070	7,61

Tablo 6.4. İyileştirilmiş sedimentlerin toplam metal miktarları

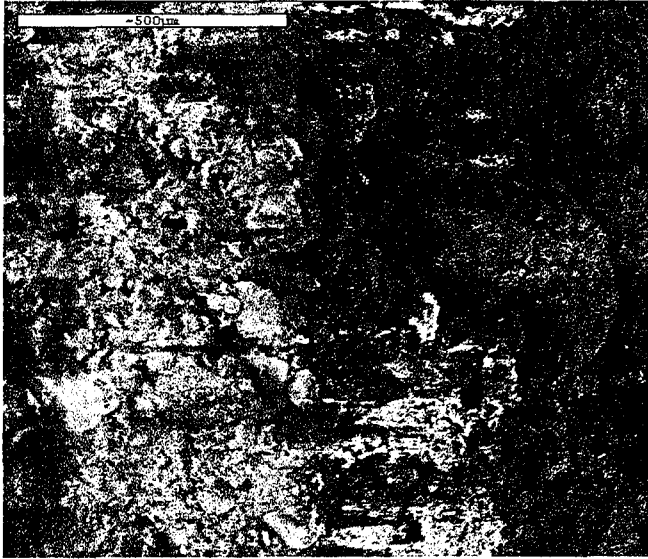
No	Oran	Toplam Metal Miktarları-mg/kg						
		Pb	Zn	Cu	Ni	Cd	Cr	Mn
	Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliği	100	300	100	100	3	100	100
1	%100 Sediment	402	465	59	152	<0.01	102	435
2	%100 Sediment+%50 Zeolit	252	201	44	134	<0.01	88	189
3	%100 Sediment+%100 Zeolit	198	153	35	121	<0.01	65	267
4	%100 Sediment+%50 Sepiyolit	169	186	48	80	<0.01	63	202
5	%100 Sediment+%100 Sepiyolit	104	166	39	94	<0.01	70	167
6	%100 Sediment+%50 Kireç	160	379	42	125	<0.01	74	178
7	%100 Sediment+%100 Kireç	164	326	31	107	<0.01	69	154
8	%100 Sediment+%50 Çimento	286	403	47	121	<0.01	81	268
9	%100 Sediment+%100 Çimento	256	305	32	99	<0.01	62	203
10	%100 Sediment+%50 Uçucu Kül	367	349	48	118	<0.01	77	410
11	%100 Sediment+%100 Uçucu Kül	281	319	41	100	<0.01	71	390

### 6.3. Mikroyapısal Özellikler

İyileştirilmiş Porsuk sedimentlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğraflarından bazıları Resim 6.1 ile Resim 6.2'de gösterilmiştir.



Resim 6.1. %100 sediment+%100 uçucu kül, karışımının SEM fotoğrafı



Resim 6.2. %100 Sediment+%100 Kireç karışımının SEM fotoğrafı

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Porsuk nehrinden alınan sedimentler üzerinde yapılan deneylerden görüldüğü gibi sedimentler yüksek plastisiteli organik zemin sınıfına girmektedir. Sedimentlerde bulunan organik madde nedeni ile su muhtevaları yüksektir. Sedimentlerin dane çapı dağılımı üniform bir dağılım göstermektedir. Silt, sedimentler içinde ağırlıkça yüksek orana sahiptir. Kil ve kum ise genelde düşüktür. Plastisite indekslerine göre yüksek plastisiteli olarak nitelendirilebilmektedirler. Sedimentlerin ağırlıklı olarak kaolin minerali olduğu tahmin edilebilir. XRD analizlerinden de görüldüğü üzere, kalsit ve kuartz örneklerde ağırlıklı olarak yer almaktadır. Kıvam parametreleri açısından sedimentlerin deniz sedimentlerine benzer bir özellik sergilediği gözlenmektedir. Dolayısıyla da yüksek sıkışabilirliğe sahip oldukları, deniz killerinde uygulanan iyileştirme yöntemleri ile benzer biçimde iyileştirilebilmeleri de söz konusu olabilecektir.

Fiziko-kimyasal özellikler açısından ele alındığında sedimentlerin pH yüksek olduğu görülmektedir. Organik madde miktarı ilk istasyon olan Çalca'da en yüksek iken bu oran giderek düşmekte ve son istasyon olan Eskişehir Pissu Arıtma Tesisi'nde yeniden artmaktadır. Sedimentlerin elektriksel iletkenliklerinin Beşdeğirmen ve Porsuk barajı istasyonlarında düştüğü görülmektedir. Kirletici kaynakların yoğunlaşmakta olduğu istasyonlarda ise yükselmektedir. pH için de benzeri durum söz konusudur. Kirliliğin azalmakta olduğu bölgelerde pH değerleri yükselmektedir. pH değerinde gözlenen bu değişim, sedimentlerde artan metal miktarları ile paralellik göstermektedir. Yoğun olarak kirletilen bölgelerde metal miktarları da artmaktadır. Toplam ağır metal miktarı açısından bakıldığında bütün sedimentlerin, Pb, Zn, Ni, Cd, Cr ve Mn değerleri sınır değerlerden yüksektir. Sadece Cu ve Cd değerleri sınır değerlerin altındadır.

Mikro yapı açısından sedimentlerin genelinde boşluklu bir yapı görülmektedir. Sedimentin yapısında diatom ve filament gibi mikroorganizmalara bolca rastlanmaktadır.

Kirliliğin yoğunlaştığı bölgeler, sanayi bölgelerine yakın olan ve arıtma tesislerinin yetersiz kaldığı bölgeler olarak gözlenmektedir. Bu bölgelerdeki

sedimentlerin temizlenmesi için sedimentlerin mevsimsel ve uzun dönemli olarak gözlenmesi sağlıklı sonuç verecektir. Çalışmada ele alınan iyileştirme yöntemlerinin Çevre Bakanlığının belirlediği kirlilik değerlerinin altına indirmekte yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlarda sedimentlerin kısmen iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Sedimentlerin en azından bölgesel olarak iyileştirilmesi için daha fazla veriye gereksinim vardır. Bunun nedeni şudur: Kirleticiler geniş bir alana yayılmış durumdadır. Dolayısıyla da izlenmeleri ve kontrol edilmeleri zordur. Porsuk Nehrinde taşınan sediment miktarı yaklaşık olarak tahmin edilmektedir ve bazı bölgelerdeki nehir suyunun akım hızının yavaş olmasından aşırı sediment biriken bölgelerin tespit edilmesi gerekir.

Sedimentlerin iyileştirilmesi kısmen gerçekleştiği için farklı yöntemler ile yeni değerlendirme ve kullanım olanakları da araştırılabilir. Literatürde sedimentlerin farklı alanlarda değerlendirilmeleri ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda belediyesel katı atıkların, çamurların ve diğerlerinin yakılması ile elde edilen uçucu küller ile çamurların eşitli işlemlerden geçirilerek yeniden değerlendirme çerçevesinde kullanımına dair örnekler bulunmaktadır. Bu uygulamalar, yapı malzemesi olarak çimento, beton, tuğla ve seramik üretiminde değerlendirilmesi ile yol yapılarında beton-asfalt üretiminde ve dolgu malzemesi olarak kullanılmasını da kapsamaktadır (Ferreire ve ark., 2002; Collivignarelli ve Sorlini., 2002). Bunların dışında ise tarımsal amaçlı olarak kullanılması da söz konusudur (Hernández-Apaolaza ve ark., 2004).

Sedimentlerin vahşi depolanması yerine yukarıda adı geçen uygulamalar kapsamında yeniden değerlendirilmesi ve yeniden değerlendirme olanaklarının araştırılması uygun olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. AKHTER, H., BUTLER, L.G., BRANZ, S., CARTLEDGE, F. K. ve TITTLEBAUM, M. E., *Immobilisation of As, Cd, Cr, and Pb-Containing Soils by Using Cement or Pozolonic Fixing Agents*, Journal of Hazardous Materials (1990)
2. APAYDIN, D., 2003, *Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemiyle İyileştirilmiş Porsuk Nehri Sediment Atık Çamurunun Geoteknik, Fiziko-kimyasal ve mikroyapısal Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 97 s., (2003).
3. ARAÚJO, F., PINHEIRO, T., ALVES, L. C., VALERIO, P. ve ALVES, J., *Elemental Composition in Sediments and Water in The Trancoa River Basin: A Preliminary Study* (1998).
4. ASSINK, J. W., *Physico-Chemical Treatment Methods for Soil Remediation, Contaminated Soils*, (1988)
5. BESTEN, P. J., POSTMA, J. F., WEGENER, J. W. N., KEIDEL, H., KLINK, MOL ve F., GUCHTE, van de C., *Biological and Chemical Monitoring After Pilot Remediations in The Delta of The Rivers Rhine and Meuse*.(2000)
6. CHAN, G. Y. S. CHU, L. M. ve WONG, M. H., *Effects of Leachate Recirculation on Biogas Production, From Landfill Co-disposal of Municipal Solid Waste, Sewage Sludge and Marine Sediment* (2001)
7. COLLIVIGNARELLI, CARLO ve SORLINI, SABRINA *Reuse of Municipal Solid Wastes Incineration Fly Ashes in Concrete Mixtures*, Waste Management 22, (2002).
8. CONNER, J. R., *Chemical Fixation and Solidification Hazardous Wastes*. Van Nostroud Reinhold, New York, (1990)
9. CULLINANE, M. J. Jr. ve JONES, L. W., *Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes, Part 2. Haz. Mat. Control*, 2 (1989a)
10. CULLINANE, M. J. Jr., ve JONES, L. W., *Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes, Part 1. Haz. Mat. Control*, 2, (1989a).
11. DEKOV, V. M., KOMY, Z., ARAÚJO, F., VAN PUT, A. ve VAN GRIEKEN, R., *Chemical Composition of Sediments, Suspended Matter, River Water and*

- Ground Water of The Nile (Aswan-Sohag Traverse)* (1997).
- 12.DPT, 1996, Diğer Endüstri Mineralleri alışma Grubu Raporu, Madencilik zel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilati Müsteşarliği Yayın No: DPT: 2421 – İK: 480
  - 13.DSI, 1980, Protection of Inland Water Quality Porsuk River Pilot Project, TUR/77/019, General Directorate of State Hydraulic Works (DSI), Ankara.
  - 14.FERRIRA, C., A. RIBERIO ve L. OTTOSEN, *Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash, Journal of Hazardous Materials*, **B96**, (2003).
  - 15.FİLİBELİ, A., Arıtma amurlarının İşlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, **255** (1996)
  - 16.GUNEY, Y. ve KOYUNCU, H. 2003, *Improvement And Distribution Of Contaminant Dark Green River Sediment, Proceedings of the First International Conference on Environmental Research and Assessment* Bucharest, Romania, March 23-27, p. 333-341.
  - 17.GÜNEY, Y. ve KOYUNCU, H., “Porsuk Nehri Dip Sedimentlerinin Kimyasal ve Mikroyapısal Özellikleri”, Türkiye Kıyıları 02, 5-8 Kasım 2002, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye (2002).
  - 18.HEAVEN, S., ILYUSHCHENKO, M. A., TANTON, T.W.,ULLRICH, S.M. ve YANIN, E. P., *Mercury in The River Nura and Its Floodplain, Central Kazakhstan:I. River Sediments And Water* (2000).
  - 19.HERNÁNDEZ-APAOLAZA, LOURDES, ANTONİO M. GASCO, JOSE M. GASCO ve FRACICA GUERRO, *Reuse of Waste Materials as Growing Media for Ornamental Plants*, Bioresource Technology (2005).
  - 20.HWANG, D., Geotechnical Performance Evaluation of Solidified Wastes, Proceedings,of the 20th Mid-Atlantic, Waste Conference, (1988).
  - 21.KAMON, M. ve MONTANADH, S. *Combining Industrial Wastes With lime for Soil Stabilisation*, Journal of Geotechnical Engineering (1991)
  - 22.KLEPPE, J. H., OTTEN, M. T. ve FINN, J. T., *Stabilisation/Solidification of Metal-Contaminated Soils: Two case Histories, Stabilisation and Solidifaction of Hazardous Radioactive and Mixed Wastes* ASTM STP 1123 (1992)
  - 23.KORFALI, SAMIRA IBRAHİM, DAVİES ve BRIAN E., *Speciation of Metals*

- in Sediments and Water in a River Underlain By Limestone: Role of Carbonate Species For Purification Capacity of Rivers* (2003)
- 24.KOYUNCU, H. ve GÜNEY, Y., *Proceedings of The First International Conference on Environmental Research and Assesment*, Bucharest, Romania, (2003).
- 25.KOYUNCU, H., GÜNEY, Y., (2002) “*Kirlenmiş Porsuk Nehri Kıyı ve Dip Sedimentlerinin Mühendislik Özellikleri*”, 4. Kıyı Mühendisliği Ulusal Sempozyumu, TMMOB Ankara Şubesi, 24-27 Ekim 2002, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Antalya, Türkiye.
- 26.KOYUNCU, H., GÜNEY, Y., (2002) “*Porsuk Nehri Dip Sedimentlerinin Geoteknik Özellikleri*”, Türkiye Kıyıları 02, 5-8 Kasım 2002, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- 27.KOYUNCU, H., *Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemi ile İyileştirilmiş, Petrollü Sondaj Atıklarının Geoteknik, Fiziko-Kimyasal ve Mikro-Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).
- 28.LECHLER, P. J., MILLER, J. R., LACERDA, L. D., VINSON, D., BONZONGO, J. C., LYONS, W. B. ve WARWICK, J. J., *Elevates Mercury Concentrations in Soils, Sediments, Water and Fish of The Madeire River basin, Brazilian Amazon: A Function of Natural Enrichments?* (2000)
- 29.MARTIN, J. P., BOWNING, J. S. ve VAN-KEUREN, E. L., *Constitutive Behaviour of Clay and Pozzolon-Stabilized Hydrocarbon Refining Waste* (1990)
- 30.MORAN, S. BRADLEY ve WOODS, L. WENDY, *Cd, Cr, Cu, and Ni in The Water Column and Sediments of The Ob-Irtys Rivers, RUSSIA* (1997).
- 31.PAMUKÇU, S. ve WINTERKON, H. F., 1989, *Soil Stabilization and Grouting, Ch. 9 in Foundation Engineering Handbook 2nd ed.*, ed. H.Y. Fang, (New York :Van Nostrand Reinhold)
- 32.TOLMAN, A. L., BALLESTRO, A.P., BECK, W. W., EMRICH, G. H. ve MARTIN, A.W., *Guidance Manual for Minimizing pollution From Waste Disposal Sites, Municipal Environmental Reseach laboratory Office of Research and Development, EPA 600/2-78-142* (1978)
- 33.TUNCAN, A., TUNCAN, M, ve KOYUNCU, H., *Petrollü Sondaj Atıklarının*

- Toprakda Meydana Getirdiği Kirliliğin Fiziksel ve Kimyasal Etkilerinin Araştırılması*, TÜBİTAK, Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu, Proje No: **KTÇAG-136** (1996)
34. TÜZÜNER, A., *Toprak ve Su Analiz Labotuarları El Kitabı*, T.C. Tarım Orman ve Köyişleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara, (1990).
35. VAN-KEURREN, E. ve MARTIN, J., *Pilot Field Study of Hydrocarbon Waste Stabilisation, Toxic and Hazardous Wastes* (1987).
36. WINTERS, W.J. 2000, *Stress History and Geotechnical and Properties of Sediment From the Cape Fear Blake Ridge Dipair*, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, **Vol. 164DIAPIR**
37. ZHANG, Z. L., HONG, H.S., ZHOU, J. L., HUANG, J. ve YU, G., *Fate And Assesment of Persistent Organic Pollutants in Water and Sediment From Minjiang River Estuary, Southeast Asia* (2003)