

**STABİLİZASYON/SOLİDİFİKASYON YÖNTEMİYLE
İYİLEŞTİRİLMİŞ PORSUK NEHRİ
SEDİMENT ATIK ÇAMURUNUN GEOTEKNİK,
FİZİKO-KİMYASAL VE MİKRO-YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

N. Deniz APAYDIN
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Eylül, 2003

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

N. Deniz Apaydın' ın Stabilizasyon/Soidifikasyon Yöntemiyle İyileştirilmiş Porsuk Nehri Sediment Atık Çamurunun Geoteknik, Fiziko-Kimyasal ve Mikro-Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi başlıklı tezi 12.09.2003.....tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı

İmza

Üye(Tez Danışmanı) : Yrd.Doç. Dr. Yücel Güney

Üye : Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

Üye : Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 17.09.2003. tarih ve 30/3.. Sayılı kararıyla onaylanmıştır.

P **Enstitü**
Fen Bilimleri Enstitüsü
M ü d ü r ü

Anadolu Üniversitesi
Merkez Kütüphane

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

STABİLİZASYON/SOLIDİFİKASYON YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMİŞ PORSUK NEHRİ SEDİMENT ATIK ÇAMURUNUN GEOTEKNİK, FİZİKO-KİMYASAL VE MİKRO-YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

N. Deniz APAYDIN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Yücel GÜNEY

2003, Sayfa 97

Porsuk Nehrinde, sediment birikmesinden dolayı taşmalar meydana gelmektedir. Bu taşmalar ve kıyı kirlenmesi nedeniyle her 3-5 yılda bir sedimentin nehirden taranması çalışmaları yapılmaktadır. Eskişehir de, içinde organik ve inorganik kimyasallar içeren Porsuk Nehri sediment atık çamurunun verdiği zarar çevre ve halk sağlığını tehdit edici riskleri oluşturmakta, yeraltı suları ile toprak kirlenmesini beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada, Porsuk Nehri sediment atık çamurunun stabilizasyon/solidifikasyon yöntemi ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Stabilizasyon işlemi için kireç, çimento ve zeolit gibi inorganik esaslı ilave malzemeler kullanılmıştır. Stabilizasyon öncesi ve sonrası numunelerin geoteknik, fiziko-kimyasal ve mikro-yapısal özellikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sediment, Stabilizasyon/Solidifikasyon (S/S) Yöntemi,
Fiziko-Kimyasal Özellikler, Mikro-Yapısal Özellikler

ABSTRACT

Master of Science Thesis

**GEOTECHNICAL, PHYSICOCHEMICAL AND MICRO STURUCTURAL
PROPERTIES DETERMINE of
PORSUK RIVER SEDIMENT EFFLUENT SLUDGE BY
STABILIZATION/SOLIDIFICATION PROCESS**

N. Deniz APAYDIN

**Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program**

Supervisor: Assos. Doç. Yücel GÜNEY

2003, Page 97

Porsuk River overflows, due to sediment accumulation. As a result of these overflows and pollution of the river banks, dredging work was carried out every 3 to 5 years. Dredged sediment is then landfilled. However, the organic and inorganic content of the sediment carry health risk and also cause underground water and soil pollution.

In this study, it was aimed to remediate the sediment from Porsuk River through stabilization/solidification process. For these purposes, inorganic materials such as lime, cement and zeolite were used. Geotechnical, physico-chemical and micro-structural studies were also achieved on the representative samples both before and after stabilization/solidification.

Keywords: Sediment, Stabilization/Solidification (S/S) Method, Physicochemical Properties, Micro Stuructural Properties

TEŞEKKÜR

Tüm öğrenim hayatım boyunca benden, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, aileme ve Sayın Abdullah Bekar'a, yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince, yardımlarından dolayı danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Yücel Güney'e, değerli bilgileri ve yardımıyla bana her yönden destek olan hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Hakan Koyuncu'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar süresince imkanlarını kullanma olanağı sağlayan Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, çalışmamın başından sonuna kadar bana destek olan tüm dostlarıma ve Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

N. Deniz Apaydın

Ağustos 2003

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı.....	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. İyileştirme Metotları.....	5
2.1.1. Fiziksel metotlar.....	5
2.1.1.1. Yıkama.....	5
2.1.1.2. Buharlaştırma.....	5
2.1.1.3. Havalandırma.....	6
2.1.1.4. Elektrokinetik iyileştirme.....	6
2.1.2. Kimyasal metotlar.....	7
2.1.2.1. Asit-Baz nötralizasyonu.....	7
2.1.2.2. Hidratasyon.....	7
2.1.2.3. Oksidasyon.....	8
2.1.2.4. Redüksiyon.....	8
2.1.2.5. Çözünme.....	8
2.1.2.6. İyon değişimi.....	9
2.1.2.7. Kimyasal Bozunma.....	9
2.1.2.8. Hidroliz.....	9
2.1.2.9. Karbonatlaşma.....	9

	<u>Sayfa</u>
2.1.2.10. Çöktürme.....	9
2.1.3. Biyolojik metotlar.....	10
2.1.4. Isıtma sistemleri.....	10
2.1.5. Diğer metotlar.....	11
2.1.5.1. Alan dışına uzaklaştırma.....	11
2.1.5.2. Yakıp yok etme.....	11
2.1.5.3. Yerinde depolama.....	12
2.2. Stabilizasyon/Solidifikasyon (S/S) Metotları.....	11
2.2.1. Stabilizasyon/Solidifikasyon terimleri.....	13
2.2.2. Stabilizasyon metotlarının sınıflandırılması.....	14
2.2.2.1. İnorganik esaslı stabilizasyon.....	14
2.2.2.2. Termoplastik stabilizasyon.....	15
2.2.2.3. Vitrifikasyon.....	15
2.2.2.4. Organik polimer stabilizasyon.....	15
2.2.2.5. Kapsülleme ile stabilizasyon.....	16
2.2.3. Stabilizasyon metotlarının karşılaştırılması.....	16
2.2.4. Stabilizasyonu etkileyen faktörler.....	17
2.3. İlave Malzemelerin Özellikleri.....	18
2.3.1. Kireç.....	18
2.3.2. Çimento.....	22
2.3.3. Zeolit.....	24
2.4. Geoteknik Özellikler.....	26
2.4.1. Fiziksel (İndeks) Özellikleri.....	27
2.4.1.1. Su Muhtevası.....	27
2.4.1.2. Birim Hacim Ağırlığı.....	28
2.4.1.3. Dane Özgül Ağırlığı.....	28
2.4.1.4. Dane Çapı Dağılımı.....	28
2.4.1.5. Atterberg Kıvam Limitleri.....	29

	<u>Sayfa</u>
2.4.2. Mekanik Özellikler.....	29
2.4.2.1. Serbest Basınç Deneyi.....	29
2.4.2.2. Permeabilite Katsayısı.....	30
2.4.2.3. Konsolidasyon Deneyi.....	31
2.5. Fiziko – Kimyasal Özellikleri.....	31
2.5.1. pH.....	32
2.5.2. Elektriksel İletkenlik.....	33
2.5.3. Organik Madde Miktarı (Ateşte Kayıp Miktarı).....	36
2.5.4. Toplam Metal Miktarı.....	36
2.6. Çevresel Şartlara Ait Özellikler.....	41
2.6.1. Sızıntı Deneyi (Leachate).....	41
2.7. Mikro – Yapısal Özellikler.....	42
2.7.1. Scanning (tarama) Elektron Mikroskobu (SEM).....	43
2.7.2. X-Ray elemental analizi.....	44
3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	45
3.1. Sediment Atık Çamuru.....	45
3.2. Kireç.....	47
3.3. Portland Çimentosu.....	47
3.4. Zeolit.....	47
4. DENEY YÖNTEMLERİ.....	49
4.1. Geoteknik Özellikler.....	49
4.1.1. Fiziksel (İndeks) Özellikleri.....	49
4.1.1.1. Su Muhtevası.....	49
4.1.1.2. Birim Hacim Ağırlığı.....	49
4.1.1.3. Dane Özgül Ağırlığı.....	50
4.1.1.4. Hidrometre Analizi.....	50
4.1.1.5. Atterberg Kıvam Limitleri.....	51

4.1.2. Mekanik Özellikler.....	51
4.1.2.1. Serbest Basınç Deneyi.....	51
4.1.2.2. Permeabilite Deneyi.....	52
4.1.2.3. Konsolidasyon Deneyi.....	52
4.2. Fiziko – Kimyasal Özellikleri.....	52
4.2.1. pH.....	53
4.2.2. Elektriksel İletkenlik.....	53
4.2.3. Organik Madde Miktarı (Ateşte Kayıp Miktarı).....	53
4.2.4. Spesifik Yüzey Alanı.....	54
4.2.5. Toplam Metal Miktarı.....	54
4.3. Çevresel Şartlara Ait Özellikler.....	55
4.3.1. Sızıntı Deneyi (Leachate).....	55
4.4. Mikro Yapısal Özellikler.....	55
4.4.1. Scanning (tarama) Elektron Mikroskobu (SEM).....	55
4.4.2. X-Ray elemental analizi.....	56
5. SEDİMETLERİN LABORATUVAR MODEL DENEYLERİ.....	57
5.1. Karışımlar-Oranlar ve Laboratuvar Model Deneyi.....	57
5.2. Geoteknik Özellikler.....	60
5.2.1.Fiziksel (İndeks) Özellikleri.....	60
5.2.1.1. Su Muhtevası.....	60
5.2.1.2. Birim Hacim Ağırlığı.....	60
5.2.1.3. Dane Özgül Ağırlığı.....	61
5.2.1.4. Hidrometre Analizi.....	61
5.2.1.5. Atterberg Kıvam Limitleri.....	63
5.2.2. Mekanik Özellikler.....	63
5.2.2.1. Serbest Basınç Mukavemeti.....	63
5.2.2.2. Konsolidasyon.....	64
5.2.2.3 Permeabilite Katsayısı.....	67

	<u>Sayfa</u>
5.3. Fiziko – Kimyasal Özellikleri.....	67
5.3.1. pH.....	67
5.3.2. Elektriksel İletkenlik.....	69
5.3.3. Organik Madde Miktarı (Ateşte Kayıp Miktarı).....	69
5.3.4. Spesifik Yüzey Alanı.....	70
5.3.5. Toplam Metal Miktarı.....	71
5.4. Çevresel Şartlara Ait Özellikler.....	75
5.4.1. Sızıntı Deneyi (Leachate).....	75
5.5. Mikro-Yapısal Özellikler.....	76
5.6. Sonuçlar.....	76
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	81

EKLER

A.Literatürde Zemin ve Sızıntı Suyu İçin Verilen Kirlilik Sınır Değerleri.....	87
B.Laboratuvar Model Deneyi Sonuçları.....	90
C.Literatürde Verilen Atık Depolama Alanı Enkesiti, Sediment Atık Çamuru ve Stabilize Edilen Sediment Atık Çamurunun Kullanılabilirliği İçin Verilen Örneğin Fotoğrafi.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

1.1. Porsuk nehrinin temizlenme işleminden görünüş.....	3
1.2. Porsuk nehrinden çıkartılan sediment atık çamurunun boşaltıldığı alandan görünüş.....	3
3.1. Porsuk nehri havzası ve sediment toplama istasyon noktaları.....	45
3.2. Sedimentin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) fotoğrafları ve XRF.....	46
5.1. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan saç kutuların fotoğrafı.....	58
5.2. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan saç kutuların şematik gösterimi.....	58
5.3. %5 oranındaki karışımların zamana bağlı çökme miktarı grafiği.....	59
5.4. %10 oranındaki karışımların zamana bağlı çökme miktarı grafiği.....	59
5.5. %5 oranındaki karışımların zamana bağlı su muhtevası değişim grafiği.....	60
5.6. %10 oranındaki karışımların zamana bağlı su muhtevası değişim grafiği...	61
5.7. Karışımların birim hacim ağırlığı değişim grafiği.....	62
5.8. Karışımların dane özgül ağırlığı değişim grafiği.....	62
5.9. Karışımların kil miktarı değişim grafiği.....	63
5.10. Karışımların silt miktarı değişim grafiği.....	64
5.11. Karışımların likit limit değişim grafiği.....	65
5.12. Karışımların plastisite indeksi değişim grafiği.....	65
5.13. Karışımların serbest basınç mukavemeti değişim grafiği.....	66
5.14. Karışımların sıkışma indisi değişim grafiği.....	66
5.15. Karışımların kabarma indisi değişim grafiği.....	67
5.16. Karışımların permeabilite katsayısı değişim grafiği.....	68
5.17. Karışımların pH değişim grafiği.....	69
5.18. Karışımların elektriksel iletkenlik değişim grafiği.....	70
5.19. Karışımların organik madde miktarı değişim grafiği.....	71
5.20. Karışımların kurşun miktarı değişim grafiği.....	72
5.21. Karışımların krom miktarı değişim grafiği.....	73
5.22. Karışımların nikel miktarı değişim grafiği.....	73
5.23. Karışımların bakır miktarı değişim grafiği.....	74

5.24. Karışımların kadmiyum miktarı değişim grafiği.....	74
5.25. Karışımların çinko miktarı değişim grafiği.....	75
5.26. Karışımlara ait SEM fotoğrafları.....	76
B.1. Sediment atık çamuru ile %30 Kireç karışımının X-Ray Elemental Analizi.....	92
B.2. Sediment atık çamuru ile %30 Çimento karışımının X-Ray Elemental Analizi.....	93
B.3. Sediment atık çamuru ile %30 Zeolit karışımının X-Ray Elemental Analizi.....	94
C.1. Literatürde verilen atık depolama alanı örneği.....	96
C.2. Sediment atık çamuru ve stabilize edilen sediment atık çamurunun kullanılabilirliği için yapılan çalışmanın görünüşü.....	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Stabilizasyon/Solidifikasyon terimleri için yapılan tanımlar.....	14
2.2. Stabilizasyon metotlarının karşılaştırılması.....	17
2.3. Stabilizasyonu etkileyen fiziksel faktörler.....	18
2.4. Stabilizasyonu etkileyen kimyasal faktörler.....	19
2.5. Literatürde verilen kireç çeşitleri ve formülleri.....	19
2.6. Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları.....	23
2.7. Portland çimentoları kimyasal bileşimleri (ASTM C150).....	23
2.8. Portland çimentosundaki ana bileşenleri.....	24
2.9. Portland çimentosundaki ana kimyasal reaksiyonlar.....	24
2.10. Zeolit minerallerinin başlıcalarının bazı fiziksel özellikleri.....	26
2.11. Toprağın elektriksel iletkenlik, toplam tuz ve bunlara göre tuzluluk derecesi.....	34
2.12. Orta Avrupa’da toprakların yıllık metal kirliliği miktarları.....	37
2.13. Leachate (sızıntı) suyunun özelliklerini etkileyen bazı faktörler.....	42
3.1. Kullanılan ilave malzemelerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri.....	48
3.2. Kullanılan ilave malzemelerin XRF elemental analizi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları.....	48
3.3. Porsuk Nehri sediment atık çamurunun toplam metal miktarı değerleri.....	48
5.1. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımların oranları ve kısaltmaları.....	57
5.2. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımların belirlenen mekanik özellik değerleri.....	68
5.3. Karışımların spesifik yüzey alanı değerleri.....	70
5.4. Leachate (sızıntı) suyu deney sonuçları.....	75
A.1. Literatürde kirli zeminler için verilen maksimum metal miktarları.....	87

A.2. Literatürde leachate (sızıntı) suyu içindeki organikler ve tuzların maksimum limitleri.....	88
A.3. Literatürde leachate (sızıntı) suyu için müsaade edilen metallerin maksimum limitleri.....	89
B.1. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımların dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı, hidrometre analizi ve kıvam limit değerleri.....	90
B.2. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımların pH, elektriksel iletkenlik, katyon değişim kapasitesi ve organik madde miktarları değerleri.....	91
B.3. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımlarda ölçülen toplam metal miktarları.....	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CAH	Kalsiyum Alüminat-Hidrat
CA	Kalsiyum Alüminat
CS	Kalsiyum Silikat
CSH	Kalsiyum Silikat-Hidrat
HCl	Hidroklorik Asit
HClO ₄	Perklorik Asit
HNO ₃	Nitrik Asit
LL	Likit Limit
meq	Miliequivalent
mS/cm	miliSimens/cm
PI	Plastisite İndeksi

Açıklama

Kısaltmalar

ASTM	American Society of Testing Materials
EDS	Energy Dispersive Spectrometer
EI	Elektriksel İletkenlik
KDK	Katyon Değişim Kapasitesi
SEM	Scanning Electron Microscopy
S/S	Stabilizasyon/Solidifikasyon
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
WEF	Water Environment Federation
X-Ray	X-Ray Flourans Elemental Analysis

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Çevre kirlenmesinin günümüzün en önemli sorunlarından biri olduğu şüphesiz bir gerçektir. Evrendeki tüm varlıkları olumsuz yönde etkileyen çevre sorunları mahalli ve bölgesel sorunlar olmayıp, global bir nitelik taşımaktadır. Bu nedenle, çevre sorunları sınırlar ötesi özelliğinden dolayı tüm dünyanın ortak gündemi haline gelmiştir. Sanayileşme ile başlayan çevre kirliliği, her geçen gün artan ve yerel yönetimleri sürekli olarak önemli bir şekilde meşgul eden bir konudur. 1960'lı yıllarda başlayan çevre kirliliği son yıllarda doruk noktaya ulaşmıştır. 2872 sayılı Çevre Kanunu'nun 2/c maddesine göre; "çevre kirliliği terimi: insanların her türlü faaliyetleri sonucu, havada, suda, toprakta meydana gelen olumsuz gelişmelerle ekolojik dengenin bozulması ve aynı faaliyetler sonucu ortaya çıkan koku, gürültü ve atıkların çevrede meydana getirdiği arzu edilmeyen sonuçları ifade eder" denilmektedir.

Pek çok yerleşim merkezimizde büyük şehirlerimiz de dahil olmak üzere katı atıklar (ticari atıklar, endüstriyel atıklar, yol ve park atıkları, hafriyat ve yıkım atıkları, atıksu arıtma tesisi atıkları, zirai atıklar, hastane atıkları ve diğer atıklar) "çöplük" denilen alanlara gelişigüzel bir şekilde yığılmaktadır. Rast gele dökülen çöpler hastalık yapıcı ve taşıyıcı canlılar için çok müsait bir üreme ortamıdır. Ayrıca uygun kriterler gözönünde bulundurularak seçilmemiş sahalara yığılan çöplerden kontrolsüz bir şekilde yayılan tozlar, sızıntı suları ve gazları çevreyi kirletici özellikler taşımaktadır. Günümüzde, insanlığın çevreye verdiği zararların boyutlarının bilinmesi, yaptığı tahribatları iyileştirici çözümler araması gerekmektedir. Yerkürenin yarıdan fazlasının su olması, insanların atıklarını kolayca bu sulara atmak yolunu seçmelerini neden olmuştur. Bugün dünyada sayıları on binleri bulan nehir, göl ve denizler kirletilmiştir. Bu sular ve içindeki sedimentler inorganik veya organik kirleticilerden etkilenecek bileşimini değiştirmektedir.

İç ve Batı Anadolu'nun çok önemli bir su kaynağı olan Porsuk nehri, Kütahya'nın batısındaki Murat Dağı'ndan doğar ve Orta Anadolu'da Kütahya ve

Eskişehir ovalarından geçer. Yaklaşık 436 kilometre yol kat ederek Polatlı İlçesinin kuzeyinde Sakarya nehrine ulaşır. Civarında milyonlarca insanın yaşadığı Porsuk nehrinde sediment yükünün $350 \text{ m}^3 / \text{km}^2 / \text{yıl}$ olduğu tahmin edilmektedir. Porsuk nehri, halen evsel ve endüstriyel atıklar ile büyük oranlarda kirletilmektedir. Porsuk nehrini kirleten başlıca kirlilik kaynakları; evsel atıksular, sanayi atıksuları, nehre atılan çöpler, suni gübreleme yapılan tarım alanlarından gelen sular ve küçük derelerle taşınan kalıntılardır. Yörede bulunan termik santrali, azot fabrikası, şeker fabrikası, evsel atıklar, şehir kanalizasyon ve fabrika arıtma tesislerinin yetersiz arıtma atıkları gibi önemli kaynakların çokluğu olumsuz bir faktör olmaktadır.

Porsuk nehrinin bu sediment yükü ve kirlilik potansiyeli büyük çevresel problem olmaya başlamıştır. Sediment her 3-5 yılda bir temizlenme ihtiyacı gösterecek şekilde birikerek ve kıyı kirlenmesine neden olmaktadır. 1995-1996 yıllarında temizlenen nehir, 2001 yılında tekrar temizlenmiştir. Şekil 1.1'de Porsuk nehrinin temizlenme işlemi gösterilmiştir. Bu yıllar arasında şehir merkezinde biriken sediment kalınlığı 2.5-3.0 metre civarındadır. Böylesine kalın ve kirli bir tabakanın temizlenme ve ıslah çalışmaları da büyük bir ekonomik kayıp getirisiyle beraber 2001 yılında temizlenen Porsuk sedimentinin büyük bir kısmı hiçbir tedbir alınmaksızın Eskişehir otoparkı karşısında nehrin yanındaki büyük ve boş bir arazide depolanmıştır. Şekil 1.2'de sedimentin boşaltıldığı arazi gösterilmiştir. Bu durum çevre ve halk sağlığını tehdit eden önemli çevre riskleri oluşmakta ve yeraltı suları ile toprak kirlenmesini beraberinde getirmektedir. Bu durum bitki örtüsünün, canlıların olumsuz etkilenmesine, hava kirlenmesine neden olabilmektedir. Ayrıca çevreye estetik açıdan zarar vermektedir. Türkiye'de yaygın şekilde kullanılan bu gelişigüzel atma veya düzensiz depolama yöntemi çevre ve halk sağlığı için uygun olmamaktadır.



Şekill.1. Porsuk nehrinin temizlenme işleminden görüntü



Şekil 1.2. Porsuk nehrinden çıkartılan sediment atık çamurunun boşaltıldığı alandan görüntü

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, Porsuk Nehri sediment atık çamurunun ilave malzemeler ile laboratuvarda stabilizasyonu araştırılmıştır. Stabilizasyon kavramını; Spencer “sağlamlık derecesi” veya “malzemelerin bazı maddeler karıştırılarak düzeltilmesi” şeklinde tanımlamaktadır. Önalp, stabilizasyonu zemin kütlesinin kayma direncini ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan her türlü proses olarak tanımlamaktadır.

Bunun için yapılan laboratuvar model deneyi olarak adlandırılan çalışmada; eni 20 cm, genişliği 30 cm ve yüksekliği 50 cm olarak yaptırılan saç kutular kullanılmıştır. Kireç, çimento ve zeolit gibi ilave malzemeler %100 sediment atık çamuru ağırlığına göre belirlenen yüzdelerde karıştırılmıştır. %5 ve %10 ilave malzemeli karışımlar; mukavemet, geçirimsizlik, konsolidasyon gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hazırlanana kutular içerisine boşaltılmıştır. Karışımların zamana bağlı çökmesi gözlenmiştir. Çökmelerin sonlanmasından sonra 7 cm çapında ve 14 cm uzunluğunda tüplerle örselenmemiş numuneler alınmıştır. Ayrıca daha yüksek orandaki ilave malzemelerin sediment atık çamuru üzerindeki geoteknik ve fiziko-kimyasal özellikleri açısından etkilerini görebilmek amacıyla %5 ve %10'luk karışımlara ek olarak %20 ve %30 'luk karışımlar hazırlanmıştır.

Hazırlanan stabilize edilmiş numuneler üzerinde, indeks deneyleri (su muhtevası, birim hacim ağırlığı, dane özgül ağırlığı, dane çapı dağılımı, Atterberg kıvam limitleri, spesifik yüzey alanı), serbest basınç deneyi, permeabilite, konsolidasyon deneyi, pH, elektriksel iletkenlik, organik madde miktarı, toplam metal miktarı, sızıntı deneyi (leachate) yapılmış ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile mikro-yapı fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca X-Ray Elemental analizi yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. İyileştirme Metotları

2.1.1. Fiziksel metotlar

Fiziksel yöntemler, çoğunlukla sıvının giderilmesini sağlayarak, katı kısımdan ayrılmasını sağlayan işlemlerdir (Burton ve Ravishankar, 1989).

2.1.1.1. Yıkama: Zemin veya atık, bulunduğu yerde yada kazılarak ayrı bir yerde zemin veya atık karakteristiğine göre uygun kimyasal maddelerle yıkanır. Yıkama sonucunda zemin veya atık içerisindeki kirletici maddeler sıvı kimyasal madde ile çözünerek sızıntı ile zeminden giderilir. Oldukça pahalı bir metot olması ile beraber geçirimli ve homojen zeminlerde daha iyi sonuç vermektedir (Dean ve ark. 1989, EPA 1990, Testa ve ark. 1991).

Sedimentlerde yıkama hidrooksitler, oksitler ve karbonatların giderilmesinde uygun olmayıp metallerin uzaklaştırılmasında etkilidir. Metallerde (civa, kurşun, kadmiyum, bakır, nikel, çinko ve krom) çökme veya iyon alışverişlerinden dolayı uzaklaştırma sağlanmaktadır. Metal Sülfürler için uygun değildir. Yıkamada nitrik, hidroklorik ve sülfürik asitler katkı maddesi olarak kullanılır. Bunun yanında sülfürik asit kullanılırsa hidroklorik asit miktarının yarısı yeterli olmaktadır. Sediment yıkama genellikle iri taneler için uygulanır. Yıkanan ince taneleri çözeltiler içerisinde zararlı maddelerden arındırılması zor olabilmektedir.

2.1.1.2. Buharlaştırma: Zeminin belirli bir basınç altında sıkıştırılarak, özellikle buharlaşabilen organik maddelerin zeminden uzaklaştırılması esasına dayanan yöntemdir (Bauman, 1987, Kampbell ve ark. 1989, Derammelaera ve ark. 1989, Wood 1994). Benzin ve gaz gibi uçucu bileşiklerle kirlenmiş zeminler için uygulanan buharlaştırma yöntemleri de vardır. Bu yöntemlerde amaç ayrı bir yerde yapılan sistem içerisinde ,14 mm civa basıncını ve 20 °C' yi geçmeyecek şekilde vakum uygulanarak buharlaştırma ve bu yolla da uçucu maddelerin

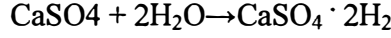
yeniden elde edilmesini sağlamaktır. Bu yöntemlerde uçucu olmayan diğer bileşikler ortamda kalmaktadır (Kellems ve ark. 1991).

Uygun hava kirliliği kontrol sistemi ile civa, arsenik ve kadmiyum ve bileşimleri 800 °C'de buharlaşabilir. Sıcaklık ve zaman zararlı maddelerden arındırma seviyelerini belirlemede ana faktörlerdir. Organik maddeleri ve metalleri sedimentten uzaklaştırmak 500 °C gibi düşük sıcaklıkta yeterli değildir. İşlemin dezavantajı nehirdeki atığın tehlikeli materyal içeriğinin olmasıdır. Sedimenti ilk önce kimyasal işlemlere tabi tutarak zararlı materyallerinin uzaklaştırılması gerekir. Termik uzaklaştırma uçucu metal olduğu için başlıca civa için uygulanır.

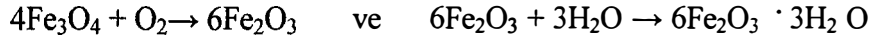
Cement Lock adı verilen Gaz Teknolojisi Enstitüsü (IGT) tarafından geliştirilmiş termik kimyasal işlem New York/New Jersey' de sedimentler için kullanılmıştır. Kullanılan sedimentin 33 mg/kg As, 37 mg/kg Cd, 377 mg/kg Cr, 617 mg/kg Pb, 1.3 mg/kg Hg, 3.2 mg/kg Se ve 1.8 mg/kg Ag metal içeriği vardır. Bu sediment döner fırında 1200-1600 °C sıcaklıkta kireçle işleme sokulmuştur. Çimentoyla toz haline getirilerek 1. Sınıf Portland Çimento yapı malzemesine dönüştürülmüştür.

2.1.1.3. Havalandırma: Zeminin kazılarak doğal bir havalandırma esasına dayanan yöntem buharlaşabilen organik kirlilikler için uygun olduğundan atıkların hepsi için geçerli değildir (Ayer, 1991).

2.1.1.4. Elektrokinetik iyileştirme: Bu metotta anyon ve katyon plaka ile elektrik akımı uygulanır. Elektrik yüklü bu bölgede, gözenekli bir ortamda sıvı hareket ettiğinde elektro osmos meydana getirir. Bu ortamda negatif yük taşıyan killer, kum ve diğer mineraller bulunur. Parçacıkların su molekülleri ile teması geçmesiyle, negatif yüzlerine pozitif iyonları çekerek nötr olurlar. Böylelikle katyonlar parçacık yüzeyindeki su içinde baskın hale gelirler ve dağınık çift tabaka oluşur. Elektrik alanı doygun bir ortamda anotlar ile uygulanırsa dağınık çift tabakadaki katyonlar katotlara doğru hareket ederler. Pozitif yüklerin bu hareketi esnasında su moleküllerinin de sürüklenmesi katoda doğru su akımı sağlar ve uygulanan bu elektrik akımı suyun akış hızını artırır. Bu sırada hidrojen

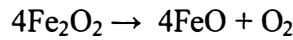


2.1.2.3. Oksidasyon: Elektron verme olayıdır. Yani oksijenin diğer elementle birleşmesi veya bir bileşikteki oksijenin artmasıdır. Daha genel anlamda elementlerin kırılarak elektron kaybetmeleri ve diğer bir elementle birleşmesidir. Örneğin, demirle reaksiyona girerse, ferro ve ferri oksite dönüşür. Örnek olarak sülfürün oksitlenmesi ile oluşan sülfat reaksiyonu aşağıdaki şekildedir (Russell 1988, Burton and Ravishankar 1989, Wood 1994).



Sedimentleri iyileştirmek için uygulanan bu metot ağır metallerin oksidasyonu/redüksiyonudur. Ağır metallerin redüksiyonunda inorganik ve organik bileşiklerin süzülerek onları en küçük birleşme değeri ve kararlı formda organometrik komplekslerinin karıştırılması zehrini giderme teknolojisi TR-DETOX olarak adlandırılır.

2.1.2.4. Redüksiyon: Redükleme olarak da bilinir. Oksidasyonun tam tersidir. Yani elektron kazanma olayıdır. Oksijen az olduğu zaman meydana gelir. Bir elementin elektron kazanması veya bir maddenin oksijen kazanmasıdır. Ortamda normalin üstünde su bulunacak olursa, yeterli oksijen sağlanamayacağı için redüksiyon olayı meydana gelir. Bataklıklarda redüksiyon olayı görülür (Russell 1988, Burton ve Ravishankar 1989, EPA 1990, Wood 1994).



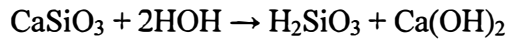
2.1.2.5. Çözünme: Kalsiyum ve magnezyum karbonatlar suda az veya çok çözünürler, fakat geriye artık bırakırlar. Çözünme ile oluşan kimyasal bozunma özellikle nemli bölgeler için önemli olduğundan atıklara uygulanabilir (Russell, 1988). Saf su kimyasal ayrıştırma için zayıf kalmaktadır ve zayıf bir eriticidir. Fakat suyun az miktardaki organik veya inorganik asitlerle birleşmesi ve tuzları

kapsaması nedeniyle çözücülük özelliği artmaktadır. Toprakta önemli miktarlarda bulunan katyonlardan kalsiyum, magnezyum, sodyum ve özellikle klorür, sülfat, bikarbonat ve karbon tuzları suda fazlasıyla çözünebilir.

2.1.2.6. İyon değişimi: Topraktaki katyon değişiminin tersidir. Negatif yada pozitif şarj parçacıkları ile atıktaki birçok metal çıkarılabilir. Bu yöntemde, atığın su muhtevasının yüksek olması gerekmektedir (Russell, 1988).

2.1.2.7. Kimyasal Bozunma: Dekompozisyon da denir. Kimyasal bozunmalar için en önemli etkenler O₂ ve CO₂'dir. Atıkta meydana gelen kimyasal bozunmalar, sıcaklık ve nem ile artar (Russell, 1988).

2.1.2.8. Hidroliz: Su kimyasal olarak aktif bir maddedir. Suyu oluşturan moleküllerden pek az bir kısmı (H⁺) ve (OH⁻) iyonlarına ayrılır. İşte bunlardan hidrojen iyonları minerallerin bileşimindeki çeşitli katyonlarla değiştirerek yeni bileşiklerin oluşumunu sağlar. Bu olaylar bilhassa bazik elementleri kapsayan minerallerde daha fazla etkisini gösterir. Hidroliz ile ilgili aşağıdaki örnek verilebilir:



Hidrojen ile bazların yer değiştirmesi olan hidroliz birçok minerallerin bileşimlerinin değişmesine yol açar. Asidik ortam hidrolizi hızlandırır.

2.1.2.9. Karbonatlaşma: Karbondioksit ile ilgili reaksiyonları kapsar. Biyolojik ve hidrasyon faaliyetleri ile birlikte yürür.

2.1.2.10. Çöktürme: Kimyasal çöktürme, katıların kimyasal ilave malzemeler katılarak çöktürülmesidir. Katı ile solüsyon birbirinden ayrılır ve solüsyon uzaklaştırılır (Burton ve Ravishankar, 1989)

2.1.3. Biyolojik metotlar

Atığın yapısında bulunan organik ve inorganik maddelerin mikroorganizmalar tarafından besin kaynağı olarak kullanılmasını sağlayıp atıktan uzaklaştırılması yöntemidir. Bu yöntemle organik maddelerin bir kısmı mikroorganizma hücresine ve bir kısmı da enerjiye dönüşür (EPA, 1990). Zeminin veya atığın mikroorganizmalar katılarak iyileştirilmesi işlemidir (Brown, 1991). Bu mikroorganizmalar, hidrokarbon bileşenlerini tüketerek bunu su, karbondioksit, mikro canlılara ve bunların çürümesiyle oluşan atıklara dönüştürürler (Bauman, 1987).

Mikroorganizmalar PAH'lar gibi sedimentlerin içindeki organik bileşenlere yönelik kimyasal işlemlerde verimli olarak kullanılmaktadır. Thiobacillus bakterisi asit ortamlarda (pH 4) 15-55 °C sıcaklıkta ve gerilmeye bağlı olarak sülfür oranını düşürür. Özütleme sülfürün asitlenerek sülfürükaasit ortaya çıkmasına böylelikle zemindeki metallerin protonların yerdeğıştirmesi ile açığa çıkmasını sağlamaktadır. Doğrudan özütleme de metal sülfütler oksidasyon ile sülfatlara dönüşür. Laboratuvar testleri sonucunda Thiobacillus bakterisi sedimentlerdeki ağır metallerin (kurşun dışında) %70-%75'ini ayrıştırabilmektedir.

2.1.4. 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, buharlaşmayan bileşenler, desorbe olur (ayrılır) ve ısı ile buharlaşır. Birçok çalışmada, zeminde organiklerin kaynama sıcaklığı olan 150 °C yi aşıldığında, bileşenler zeminden desorbe olmaktadır ve % 99'luk bir iyileştirme elde edilebilmektedir (Ayer, 1991).

2.1.5. Diğer metotlar

2.1.5.1. Alan dışına uzaklaştırma: Kirli alanın, atıkların veya sedimentlerin kazılarak kepçelerle araca yüklenip zararsız bir bölgeye yığılmasıdır. Bu yöntem ekonomik olmadığı ve zararın giderilmesi düşünülmediği için günümüzde geçerliliğini kaybetmeye başlamıştır (Ayer, 1991).

2.1.5.2. Yakıp Yok etme: Katı atıkları hijyeniklik olarak zarar vermesini önlemek amacıyla yakılmasıdır. Yakma genellikle aşağıda sayılan durumlar için uygulama alanı bulmaktadır;

-Hacim ve ağırlık küçültme oranının yüksek olması nedeniyle depolama yeri sıkıntısının çekildiği metropollerde,

-Hastane çöplerinde olduğu gibi nihai ürünün stabilize edilmesinin gerekli olduğu durumda,

-Isıl değeri yüksek katı atıklarda enerji üretiminin söz konusu olması halinde.

Günümüzde uygulaması devam etmekte ve yaygındır.

2.1.5.3. Yerinde Depolama: Geçirimsiz bir tabakanın toprağa serilmesi ve depolanan atığın üzerinin gene geçirimsiz bir tabaka ile örtülmesi depolama alanları inşa edilir. Yaygın olarak kullanılmasına karşın kullanılan malzemelerin maliyetinin yüksek olması dezavantajdır (Dean ve ark., 1989)

2.2. Stabilizasyon/Solidifikasyon (S/S) Metotları

Stabilizasyon/Solidifikasyon metotlarının amacı sedimentler içersindeki ağır metal bileşenleri kireç, çimento, uçucu kül ve/veya diğer kimyasal malzemeler katılarak azaltarak; fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak iyileştirilmiş yeni karışımlar elde edilmektedir.

Martin ve ark. (1990), asidik hidrokarbonlu arıtma çamurlarının pozolan esaslı stabilizasyonu için, çimento, kireç ve fly ash gibi ilave malzemeler kullanmışlardır. İlave malzemeler ile çamurun pH değeri yükselmiş, serbest basınç mukavemeti artmış ve geçirimsizlik azaltılmıştır. İlave malzemeler ile

pozolanik reaksiyon meydana gelmekte kirlilik kapsüllandığını görmüşlerdir. Pozolanik çimentolaşma reaksiyonları kapsülleme ve fiksasyon (sabitlenme) meydana getirdiğini belirlemişlerdir.

Van-Keuren ve Martin (1987), hidrokarbonlu atıklara uygulanan laboratuvar deneyleri sonucunda, üç değişik karışım tespit ederek araziye uygulamışlardır. Bu üç değişik karışımın birincisi atık-kil-fly ash-kireç (1-1-0.75-0.2), ikincisi atık-fly ash-kireç (1-0.3-0.1) ve üçüncüsü atık-fly ash-çimento-kireç (1-0.3-0.05-0.05) karışımlarıdır. Bu karışımlar stabilize edildikten sonra atık depolama ünitelerine konularak sızıntı ile oluşabilecek zemin kirliliğini en aza indirmişlerdir.

Jones (1990), stabilizasyon/solidifikasyon yöntemlerini etkileyen bazı faktörlerin etkisini tartışmıştır. Çimento ve pozolan özelliklerinin atık içeriğini etkileyeceği, uzun süreli durabilite ve sızıntı kontrolü için bağlayıcı ve pozolanların karakteristiklerinin çok, iyi anlaşılması gerektiği, hidratlanma ve betonlanma sonrasında oluşan küçük ve büyük boşluk büyüklüklerinin permeabilite, durabilite ve mukavemeti etkileyeceğini belirtmiştir.

Brown (1991), kirlenmiş zeminlerin iyileştirme yöntemlerinin tercih edilmesinde iklim, taşıma, jeoloji, mühendislik faktörleri gibi teknik durum ekonomi, çevre, hukuki kanunlar ve siyasi idareye bağlı olduğu ve bunun aşılması gerekli yasaların çıkarılmasını, alternatif yöntemlerle iyileştirmelere karar verilerek problemin aşılması gerektiğini belirtmiştir.

Tolman ve ark. (1978), uzaklaştırma sahaları olan depolama bölgelerinde kirliliğin azaltılması için yaptıkları araştırmayı sunmuşlardır. Burada, yüzey sularının kontrol edilmesi, depolama ünitesinde üst yüzey eğiminin %6-12 arasında tutulmasının, başlığın kil, çimento ve kireç katkıları ile stabilizasyona tabi tutularak geçirimsizliğin sağlanması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca üzerinde bitki yetiştirilebilmesi için 0.6 m kalınlığının olması ve en az iki yıllık bir sürecin geçmesi gerektiğini belirlemişlerdir. Yeraltı suyunun kontrol edilmesi depolama ünitesine ulaşmasının önlenmesi için akış yönünde geçirimsiz bentonit duvar yapılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

Assink (1988), zeminden kirliliğin kaldırılması için kirleticiler ile zemin arasındaki etkileşimin fiziko-kimyasal özelliklerinin bilinmesiyle daha kesin

çözümler elde edilebileceğini belirtmiştir. İyileştirme metotlarında, iklim, yeraltı suyu, mikroorganizmalar ve bitkilerin de etkili olduğu, özellikle bazı ağır metal kirliliği içeren zeminlerin kazılarak iyileştirme işlemine tabi tutulmasının daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Akhter ve ark. (1990), inorganik madde içeren atıklarla kirlenmiş zeminlerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak Tip I portland çimentosu, F tipi fly ash, fırın cürufu, silika ve kireç kullanılmış ve işlemlerin sonucunda sızıntı deneyleriyle arsenik, krom, kadmiyum ve kurşun metal içeriklerine bakmışlardır.

Canter (1990), zemin kirliliğinin iyileştirilmesi amacı ile üç bölgede, 5 yıl süre ile 27 programa bağlı olarak 127 temizleme tekniği gerçekleştirmiştir. Mühendislerin dizayn bilgisi için; organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında fiziksel ve kimyasal metotlardan, karbon adsorpsiyonu, havalandırma ve zayıf bileşenleri havalandırma yöntemlerini, inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için ağır metalleri, nitratları ve eriyebilir katıları iyileştirme metotlarını ,organik kirleticilerin uzaklaştırılması için biyolojik metotları ve yerinde uygulanabilir metotları önermiştir.

Kleppe ve ark. (1992), metal ile kirlenmiş zeminlerin stabilizasyon ve solidifikasyonu için Washington'da iki ayrı bölgede farklı oranlarda kireç ve portland çimentosunu ayrı ayrı kullanarak serbest basınç, sızıntı ve toplam metal belirleme deneyleri yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bütün sahalardaki metal içeriğinin çok değişkenlikler gösterdiği, karışım mukavemetlerinin doğal organikler ve petrol hidrokarbonları ile azaldığı, sızıntı deneyi sonucunda olumsuz sonuçlar verecek şekilde çimentonun bazı metaller içerdiği ve zemin+çimento karışımlarının sızdırma kapasitesini azaltmadığını belirtmişlerdir.

2.2.1. Stabilizasyon/Solidifikasyon terimleri

Stabilizasyon, kirliliğin kapsüllenmesi, solidifikasyon. fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi olarak tanımlanır (EPA 600, 1977; EPA 600, 1990; EPA 540, 1986; Hwang 1988; Conner 1990). Öncelik çamurlar olmak üzere bütün endüstriyel atıklara uygulanan genel bir yöntem olarak da adlandırılmaktadır

(EPA 600, 1978). Stabilizasyon ve solidifikasyon terimleri için diğer tanımlamalar izelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Stabilizasyon ve solidifikasyon terimleri için yapılan tanımlar

Stabilizasyon	Kirlilik kimyasal olarak değiştirilerek sabitlenir (bağlanır). ¹ Kirlilik örtülür (kapsüllenir). ² Fiziksel zelliklerin değiştirilmesi şart değildir. ^{3,4,5} Stabilizasyon sonunda malzeme mukavemet kazanır. ³
Solidifikasyon	Fiziksel olarak kirlilik etkisiz hale getirilir. ¹ Fiziksel zellikler iyileştirilir. ² Kimyasal bir bağ oluşturulması şart değildir. ^{3,4,5} Mekanik bir bağlanma gereklidir. ^{3,4,5}
Stabilizasyon/Solidifikasyon/Fiksasyon	Kirliliğin azaltıldığı bütün tarzlardır. ⁶ Yüzey alanları azaltılarak kirlilik azaltılır ve bileşenlerin transferi önlenir. ⁷ Kirlenici bileşenlerin znebilirliği sınırlanır. ⁷

¹Roberts 1992, ²Hwang 1988, ³Cullilane ve ark.. 1986, ⁴Merrit ve ark. 1993, ⁵Conner 1990, ⁶Brown 1991, ⁷EPA 600, 1979.

Yukarıda verilen kavram kargaşasının önlenmesi amacıyla, Amerikan evre Koruma Ajansı olan U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), bütün kimyasal fiksasyon ve solidifikasyon tarzlarını stabilizasyon olarak adlandırmıştır (Conner, 1990).

Stabilizasyonda, kirliliği azaltmak, atıktaki hacim değişikliklerini önlemek, atık içersindeki ağır metal bileşenlerini azaltmak, atık malzemeyi fiziksel ve kimyasal olarak stabil malzeme haline getirmek ve permeabiliteyi azaltarak sızmayı engellemek stabilizasyonun başarı ile sonuçlanması için önemli kriterlerdir.

2.2.2. Stabilizasyon metotlarının sınıflandırılması

2.2.2.1. İnorganik esaslı stabilizasyon: Kireç, imento, kil ve/veya diğer inorganik esaslı katkı malzemeleri ile atığın yada zeminin stabilizasyonudur.

Kireç katkı malzemesi olarak stabilizasyonda sık kullanılır. Kireç ile ince daneli silika malzemeler arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelerek, betona benzer kalsiyum silikatlar oluşur (EPA 600, 1979).

Çimento katkılı stabilizasyon özellikle ağır metal içeriği yüksek seviyede olan endüstriyel atıklarda kullanılmaktadır. Çimento, atık ve su ile birleştiğinde kimyasal reaksiyonlar meydana gelir (EPA 600, 1979).

Kil katkısı, absorbent ve silika kaynağı olarak atık stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Kil, çimento veya diğer ilave malzemeler ile de kullanılabilir (EPA 600, 1979).

2.2.2.2. Termoplastik stabilizasyon: Bitümen, parafin veya polietilen gibi plastik organik maddeler eritilir, kurutulmuş zeminle yada atıkla belirli bir sıcaklıkta karıştırılır ve karışım soğuduktan sonra katı bir kütle haline dönüşür (Kellems, 1991). Atıklar sızıntıya karşı emniyetli olarak bu şekilde örtülebilir bununla beraber pahalı oluşu, ısıtma esnasında hava kirliliğine sebep olması gibi dezavantajları vardır (EPA 600, 1979).

2.2.2.3. Vitrifikasyon: Camlaştırma yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemde atık içersine elektrotlar daldırılır ve vitrifikasyon gerçekleşmesi için elektrik akımı geçirilir. Elektrik akımı güçlü olmalıdır. Atık 2000 °C'ye kadar ısıtılır bu sıcaklık sedimentde 3000 °C'ye erişebilmektedir. Bu sıcaklıkta atık erir ve soğuduktan sonra katı camsı bir blok oluşur. Atıktaki kirlilik bu katı içersinde tutularak hareketsiz forma dönüştürülür (Kellems ve ark., 1991).

Sedimentlerin yüksek su muhtevası değerlerinde yakıt tüketimi artmakta ve maliyet yüksek olmaktadır. Organik içeriklerinin fazlalığı, kadmiyum, civa ve kurşun gibi ağır metal seviyelerinin yüksek olması verimi düşürmektedir. vitrifikasyon esnasında zehirli gazlar oluşabilmektedir.

2.2.2.4. Organik polimer stabilizasyon: Organik polimer stabilizasyon tekniği radyoaktif atıkların katılaştırılıp taşınması için kullanılmaktadır. Uygulanan organik polimer tekniklerinin en iyisi üre-formaldehit tekniğidir. Polimerlerin kauçuk, polietilen, PVC (polivinil klorür), polistiren gibi bir çok çeşidi vardır. Bu

tekniklerde polimerler, bir atık havuzunda veya özel olarak dizayn edilmiş bir mikserde yaş veya kuru atıklarla karıştırılır. Polimerli malzemeler, atık ile kimyasal olarak reaksiyona girmez. Yumuşak likit polimer, katı parçacığı reçine (sakız) gibi tamamen içine alır. İşlemden sonra katılaştırılmış polimer kurutulmalıdır. Atık ile kimyasal reaksiyona girmemesi sonucu, atık malzemelerin parçacıkları organik reçine içerisine sadece hapsedilmiş olur (EPA 600, 1979).

2.2.2.5. Kapsülleme ile stabilizasyon: Bütün stabilizasyon tarzları, atık malzeme parçacıkların bağlayıcı maddeler ile bir bağ oluşturma esasına dayanır. Atık parçacıkları, kaplanarak sertleştiği zaman, atık kapsüllenmiş veya örtülmüş (encapsulated) olmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan bağlayıcı ile atıktaki parçacığın üzeri kaplanmış olmaktadır. Atık malzemesi kuru olmalıdır. Bağlayıcı oranı, %3 ile %4 miktarlarında uygulanır. Bağlayıcı olarak genelde uygun bir hidrokarbon olan polibütadin kullanılır. Aseton çözeltisi içerisinde bulunan modifiye polibütadin ile kuru atık beş dakika karıştırılır ve iki saat kadar bırakılır. Kaplanan malzemeler, bir mold içinde, mekanik bir basınç altında 120-200 °C arasında ısıtılır ve ürün eritilip birleştirilir. Böylece katı, sert ve yoğun bir aglomera blok oluşur. Polietilen kaplama, katı bu blok üzerinde erir ve polibütadin bağlayıcıya yapışır. Bir blok 360 kg ile 450 kg arasındadır. Bu tarzla stabilize edilen atık, su ile asla temas edemez, ve bozulmadan kalır. Kaplama reçinenin pahalı oluşu, kurutma, ısıtma ve eritme için enerjiye ihtiyacın bulunması, polietilenin 250 °C’de alev alması, donanım ve yüksek maliyetleri gerektirmektedir (EPA 600, 1979).

2.2.3. Stabilizasyon metotlarının karşılaştırılması

Stabilizasyon metotları için yapılan karşılaştırma (EPA 600, 1979, Conner 1990) Çizelge 2.2’de görülmektedir. Literatürde yapılan bu deneylerden de görüldüğü gibi, inorganik esaslı stabilizasyon tarzları birçok durumda avantajlara sahiptir. Stabilizasyon işlemlerinin kolaylığı, maliyetinin düşük olması, uzun süreli stabilitesinin olması, ilave malzemelerin hemen her yerde kolayca bulunabilmesi ve tehlikesinin olmaması ile bütün dünyada geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

2.2.4. Stabilizasyonu etkileyen faktörler

Atık veya zemin bünyesindeki bir takım fiziksel ve geoteknik özellikler, stabilizasyonu etkileyen önemli faktörlerdir. Bu sebeple hem atığın ve hem de kirlenilen zeminin fiziksel ve kimyasal etkenlerinin stabilizasyonu ne şekilde etkileyebileceği araştırılmaya çalışılmaktadır. Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'de stabilizasyonu etkileyen fiziksel ve kimyasal faktörler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Stabilizasyon metotlarının karşılaştırılması*

Metot	Avantaj ve Dezavantajları
İnorganik Esaslı (kireç, çimento, alçı, kil, v.s.)	Malzemeler kolayca temin edilebildiğinden uygulama alanı oldukça geniştir.
	Maliyeti düşüktür.
	İlave edilen malzemelerin kimyasal olarak zehirliliği yoktur.
	Stabilizasyon işlemleri kolaydır ve çok özel aletler ve malzemeler gerekmez.
	Hem fiziksel, hem kimyasal olarak uzun süreli stabilitesi çok iyidir.
	Ultraviole ve radyasyon tehlikeleri yoktur.
	Biodegradasyona karşı büyük bir direnç gösterirler.
	Stabilize edilmiş malzemenin permeabilitesi düşer, mukavemeti artar.
	İyi bir mekanik ve yapısal karakteristik gösterir.
	15 yıldır yapılan işlemlerde başarı sağlanmış ve iyi bir döküman elde edilmiştir.
Organik Esaslı (organik polimerler, Biyolojik yöntemler vs.)	Yüksek bir fiatı vardır.
	Çok düşük bir Permeabilite elde edilir.
	Bir çok atık için uygulanabilir.
	Ultraviole ışınlarının önlemede tam başarılı sayılmaz.
	Mikroorganizmalar için elverişli değildir.
	Uzun süre degradasyon etkisine sahiptir.
	Uzun süreli stabilite sağlayamaz.
	İnorganik sistemlere göre uygulanması çok zor ve özel aletler gerekir.
	Bazı sistem bileşenleri için tehlikelidir.

*Conner, 1990.

Çizelge 2.3. Stabilizasyonu etkileyen genel fiziksel faktörler*

İlave malzeme miktarı	Kür zamanını, mukavemeti, permeabiliteyi, birim hacim ağırlığını, poroziteyi, boşluk oranını ve durabiliteyi etkiler.
Karışım zamanı	Atık miktarı çok ve karıştırma az olursa stabilizasyon reaksiyonlarının oluşması zorlaşır.
Tekstür	Dane çapının dağılımının iyi derecelenmiş olması, boşlukların az olması, mukavemetin yüksek olması gibi avantajlar sağlar.
Organik madde miktarı	Stabilizasyon reaksiyonlarını azaltır ve mikroorganizmalar kalsiyum iyonlarının bir kısmını kullanılır.
Havanın nem miktarı	İyi bir kür ve reaksiyon için olumlu bir etki gösterir.
İklim	Stabilizasyon reaksiyonlarında sıcaklık önemli bir etkidir.
Porozite	Zeminin gözenekliliği artarsa, stabilizasyon malzemeleri artar.
Su muhtevası	Su muhtevasının artması, stabilize malzemenin katılaşması için olumlu etki yapmaktadır.
Toplam katı miktarı	Toplam katı miktarının artması ile yüksek bir dane özgül ağırlığı ve düşük viskozite oluşacağından, kür ve katılaşma zamanı artar.
Petrolün gravitesi	Petrolün gravitesine bağlı olarak kirlilik artmaktadır.
Viskozite	Sıvı çok akışkan ise daha çok ilave malzeme gerekir.
YASS derinliği	Su seviyesini yakın ise stabilizasyon malzemeleri artar.
Havanın sıcaklığı	10°C'nin üstünde oil degrasyonunu oluşturur.
Kür zamanı	Sertleşme gerekli olan süre birim hacim ağırlığını, Atterberg kıvam limitlerini, permeabiliteyi, sıkışabilirliği, mukavemeti, poroziteyi, boşluk oranını ve durabiliteyi etkiler.

*Shields 1989, Conner 1990.

2.3. İlave Malzemelerin Özellikleri

2.3.1. Kireç

Kireç, çoğunlukla kalsiyum oksit (CaO) olarak adlandırılır. Kalker veya kireçtaşının (CaCO₃) öğütülerek 1800 °F (980 °C)'de pişirilmesi ile elde edilir. Kalker, kimyasal bileşiminde asgari %90 kalsiyum karbonat (CaCO₃) bulunan tortul kayalara denir. Ayrıca mineroloji biliminde %90 kalsit minerali içeren kayalara da kalker denmektedir. Kalker saf halde iken az miktarda aragonit içerir. Kalsit ve aragonit teorik olarak %56 CaO, %44 CO₂ ihtiva eder. Kalkerin özgül ağırlığı 2.5-2.7 gr/cm³ arasındadır (Kamon ve ark., 1991).

Kireç hidrolik bir bağlayıcı değildir, çünkü su altında sertleşmek için gerekli olan karbondioksiti bulamaz. Çeşitli tiplerde bulunduğu için literatürde farklı isimler altında toplanmıştır. Bu isimler ve bunların formülleri Çizelge 2.5’de verilmiştir (Van Note 1987, Pamukçu 1993, Pamukçu ve ark. 1989, Van Keuren ve ark. 1987a).

Çizelge 2.4. Stabilizasyonu etkileyen genel kimyasal faktörler*

İnce partiküller (kolloidler)	Kür edilmiş karışım üzerinde negatif etki meydana getirerek ve kür ve katılma zamanını geciktirir.
pH	Oluşacak kimyasal reaksiyonlarda atık ve ilave malzemenin pH değerleri, stabilizasyon sonu pH değerini bu da metallerin çözünürlüğünü, kür zamanını ve pozolanik reaksiyonların başarısını etkiler.
Katyon değişim kapasitesi	Organiklerin ve metallerin adsorbe edilebilme kapasitesini etkiler.
İyon değişim içeriği	Kür ve katılma zamanını geciktirir.
Grease ve oil gibi hidrokarbonlar	Parçacıkların üzerini kaplayarak kür zamanına negatif etki yapar.
Asitler ve bazlar (inorganikler)	Kür zamanına negatif etki yapar.

*Shields 1989, Conner 1990.

Çizelge 2.5. Literatürde verilen kireç çeşitleri ve formülleri*

Kireç Cinsleri	Formülü
Sönmüş Kireç (Carpid-Slaked Lime, Calcium Hidroksit)	Ca(OH) ₂
Sönmemiş Kireç (Quicklime-Calcitic Quicklime)	CaO
Kalsiyum Karpit	CaC ₂
Kalsiyum Karbonat (Calcite)	CaCO ₃

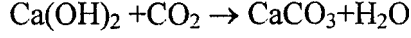
*Martin ve ark. 1990, Pancoski ve ark. 1988, Zarlinki ve ark. 1991.

Kireç ile stabilizasyon sonunda oluşan reaksiyonlardan birisi katyon değişimi ve flokulasyon-agloremasyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonlara kolloidal (<0.001 mm) reaksiyonlar da denir. Bu reaksiyon zemin, sıvı ve kireç arasında oluşan ilk reaksiyondur. Kirecin kuvvetli Ca⁺⁺ iyonları, kil yüzeyindeki diğer sodyum, magnezyum ve hidrojen gibi zayıf iyonlarla yer değiştirir ve kil daneleri

yüzey uç etkileşimi ile birbirini çeker. İyon alışverişinde kil daneleri kalsiyum katyonlarını yüzeylerinde tutarlar. Kil yüzeyi üzerinde diğer iyonlarda bulunmaktadır, ancak kil yüzeyindeki kalsiyum katyonları hakim durumdadır. Bu iyon değişimi kil danelerinin yüzeyindeki elektrik yüklerini değiştirmektedir. Kil danelerinin birbirlerine yapışması, iyonların yük ve büyüklüğüne bağlıdır. Tek değerlikli iyonların yerini alan iki değerlikli kalsiyum iyonları, kil danelerini birbirlerine çeker. Bu reaksiyon olurken killi toprağın plastisitesi düştüğü gibi, toprak daha gevşek bir hal alır. Özellikle kil içeriği yüksek topraklar siltimsi bir hal alırlar. Zemin yapısı daha irileşir, yani dane çapı artar ve koagülasyon meydana gelir. Likit limit azalır ve zemin daha az plastik hale gelir. Atıkların plastisitesini azaltarak plastikten katı hale geçmesini sağlar. Atığın çalışabilirliğini ve yük taşıma kapasitesini artırır. Atıklardaki sıvı miktarı azaltılıp kuru malzeme elde edilebilir. Bunlar ani reaksiyondur yani zaman gerektirmez ve genellikle birkaç gün içinde tamamlanır (Koyuncu, 1998).

Oluşan diğer reaksiyon ise pozolanik veya bağlayıcı (çimentolaşma) reaksiyonudur. Zemin veya atık ile toprak kireç arasında meydana gelen en önemli reaksiyonlardan birisi de, kireçteki kalsiyum katyonu ile toprakta mevcut olan alüminyum ve silisyum minerallerinin reaksiyona girerek kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikatlar meydana getirmesidir. Kil yüzeyindeki silikatlar Ca^{++} tarafından tutulur. Neticede camsı (jelatin) bir malzeme (CS-kalsiyum silikat veya CA-kalsiyum alüminatlar) oluşur. Bu kalsiyum silikatlar zamanla sertleşir ve suda erimeyen oldukça dayanımlı bir bağlayıcı yani çimentolaşmış bir karışım elde edilir. Meydana gelen bu bileşikler çimentonun hidrasyonundan meydana gelen bileşiklere benzer. Daha sonra kalsiyum silikatların (CS) su ile teması neticesinde CSH-kalsiyum silikat hidratlara dönüşür. Aynı şekilde, kalsiyum alüminatlar (CA), CAH-kalsiyum alüminat-hidratlara dönüşür. Bu reaksiyona da hidrasyon reaksiyonu denir. Pozolanın tipi ve miktarı ile kirecin aktivitesi çimentolaşmayı etkiler. Toprağın içerisinde arzu edilen miktarda pozolan mevcut değilse, suni pozolanlar ilave etmek sureti ile çimentolaşmanın oluşması sağlanır. Killerin bir kısmı (montmorillonit) esasen pozolanik olup, kireç ile çimentolaşma yapar. Kaolinit, illit ve klorit gibi killerde tabii pozolanik hassasiyet mevcut değildir (Koyuncu, 1998).

Karbonatlaşma olayı ise kirecin havadan karbondioksit emerek, reaksiyona girmesidir. Karbondioksit, kalsiyum karbonat teşkil etmek üzere kalsiyum hidroksit ile aşağıdaki gibi reaksiyona girer.



Toprak ile kireç karışımında, kalsiyum karbonatın meydana gelmesi, çimentolaşma olayını etkilediği gibi, pozolanik reaksiyona mani olur. Toprak ve kireç karışımının normal mukavemet kazanmalarını önler. Bu nedenle, sönmüş kirecin hava ile teması önlenmeli ve hemen kullanılmaya çalışılmalıdır.

Genel olarak kireç ile stabilizasyon sonunda meydana gelen reaksiyonlar ve onların fiziko-kimyasal değişimleri şu şekilde özetlenebilir. Kimyasal bağ ile kirletici içindeki ağır metal gibi zararlı madde miktarında azalma olur. Ortamdaki sıvı miktarını azaltır ve böylece kil danesi etrafındaki dağınık çift tabakanın (diffuse double layer) kalınlığını azaltır. Karışımın serbest basınç mukavemetini ve donma/çözölmeye karşı mukavemetini artırır. Ancak zemin cinsine bağlı olarak değişen belirli bir kireç miktarından sonra mukavemet artışı olmaz. pH değerini yükselterek mikroorganizmaların gelişimini engeller ve atık bozularak çevreye karşı kötü koku oluşturmaz. Permeabilite azalır. Hidrokarbonların çözünürlüğü oldukça azalır (sızıntı suyu temizdir). Şişme gösteren zeminlere Ca⁺⁺ ilavesi likit limiti düşürdüğünden şişme potansiyeli ve plastisite azalır. Adsorbsiyon özelliği kaybolur ve hacim artar (Pamukçu ve Winterkorn, 1989).

Kireç ilave etmekle, likit limitte azalma, plastik limitte artış meydana gelir. İlave edilen kireç miktarının artırılması ile likit limitin azalması bazı topraklarda görülmeyebilir. Çok plastik topraklara kireç ilavesi, likit limit azaltır, az plastik veya plastik olmayan topraklarda ise likit limit artmaktadır. Killi topraklara kireç ilave edilirse hacimde azalma meydana gelmektedir. İlave edilen kirecin tesiri ile büzölme limiti artmakta ve büzölme oranı azalmaktadır (Koyuncu, 1998).

Kireç ilave edilen topraklarda mukavemeti değerlendirmek için serbest basınç, kaliforniya taşıma oranı (CBR), Hveem Stabilometrisi, üç eksenli basınç mukavemeti, penetrasyon iğnesi deneyleri yapılmaktadır. İlave edilen kireç

miktarı artıka, serbest basınç ve CBR değerleri artmaktadır. Ancak optimum kireç miktarı, toprak ağırlılığının %8-%10'u arasında olmaktadır. Toprak ile kireç karışımlarının zaman ile mukavemetleri artmaktadır. Ve bir daha toprak eski haline dñnememektedir. Bu nedenle uzun ömürlü sayılmaktadır. Plastisite indisinde çok az azalma olmasına karşı mukavemette bir azalma olmamaktadır. İlave edilen kireç miktarının artmasına paralel olarak karışımın arazi rutubeti de artmaktadır. Killi toprakların şişme basıncı yüksektir. Kireç ilavesi ile şişme basıncında önemli azalmalar olmaktadır. Montmorillonit kiline %8 kireç ilavesi ile şişme basıncı, 7 psi'dan 1 psi'ya düşmüştür (Atanur, 1973).

Toprak ve kireç karışımlarındaki fiziko-kimyasal olaylar sonucu karbonatlaşma ve topaklanma (flokülasyon) fiziksel değişimler de görölmektedir (Atanur 1973, Martin ve ark. 1989, Pamukçu ve ark. 1989b).

2.3.2. Çimento

Çizelge 2.6'da gösterilen killi ve kalkerli hammaddeler öğütölerek fırında 1400 °C de pişirilir ve pişmiş yarı ürün olan klinker elde edilir. Bu klinkere bir miktar (%3-5) alçıtaşı (jips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılır ve birlikte çok ince parçacıklar oluşturabilecek şekilde öğütölerek çimento elde edilir. Çimento, havada ve suda sertleşen ve sertleştikten sonra da suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı bir maddedir. Çimentonun özgül yüzey alanı 2800-4000 cm^2/gr arasında değişmektedir. Yüzey alanı arttığında su ile temas eden yüzey artar, sertleşme hızlı ve daha iyi oluşur. Özgül ağırlıkları 3.10-3.16 g/cm^3 arasındadır.

Burada katılan alçıtaşı çimentonun sertleşme hızını kontrol ederek katılaşmasını (prizini) geciktirir. Klinkere alçıtaşı katıldığında kalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni, alçı ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfö alüminatlar (C-S-A) oluşur. Bu kalsiyum sülfö alüminatlar ise kalsiyum alüminat (C_3A)'ların reaksiyon hızını yavaşlatır. ASTM C150 standartlarına göre portland çimento sınır değerleri Çizelge 2.7'de verilmiştir. Çimento, daneli atıklarda daha iyi sonuç vermektedir. Uygulanan atık:portland çimento oranı 2:1 değerini geçerse EP Toxicity Test sonuçları üzerinde negatif etki oluşturur ve atık stabilizasyonu üzerindeki etkisi azalmaktadır (Note, 1987). Zemin yada atık ile reaksiyona giren

çimento stabilize edilmiş malzemenin mukavemetini artırmakta, permeabilitesini ise azaltmaktadır.

Çizelge 2.6. Çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynakları

Madde	Kaynağı
Kalsiyum karbonat	Kireçtaşı, tebeşir, mermer, midye kabuğu, aragonit kumları, çimento, kireçtaşı, lümaşel, kavkılı kireçtaşı
Silis	Kum, kumtaşı, kuvars, kil, kıltaşı, fuller toprağı
Alümin kaynakları	Fly ash (kül), kaolinit, şeyl, kil, metal eritme artığı, alüminyum cevher artıkları, alüminyum silikat, İnce öğütülmüş granit.
Demir kaynakları	Demir cevheri, demirtozu, pirit, demirli sinter, demir oksit.

Çizelge 2.7. Portland çimentoları kimyasal bileşimleri (ASTM C150)

Kimyasal Bileşikler (%)	Tip:I	Tip:II	Tip:III	Tip:VI	Tip:V
CaO (kalsiyum oksit)	64	63	65	60.5	60
SiO ₂ (silikon dioksit)	21	22	20	24	26
Al ₂ O ₃ (alüminyum dioksit)	6.5	5	5.5	5	2.5
Fe ₂ O ₃ (ferrik dioksit)	2.5	4	3	4.5	1.5
MgO (magnezyum oksit)	2.5	3	2.3	3	2.5
SO ₃ (sülfür trioksit)	2.1	1.5	2.5	1.7	2
Çözünmeyen Madde	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sertleşmenin Başlaması	6 dk.	6 dk.	6 dk.	6 dk.	6 dk.
Sertleşmenin Bitmesi	10 sa.	10 sa.	10 sa.	10 sa.	10 sa.

Çimento ilave edilmiş kil ve silt zeminlerin özellikleri ile asit ve baz zeminlerin özellikleri değişir. Çimento ile atık içindeki organiklerin zararları azaltılır (Conner, 1993). Çimento ilavesi zeminin likit limit ve plastisitesini azaltmaktadır.

Çimento ve suyun birleşerek kimyasal reaksiyonların oluşmasına hidrasyon denir. Kalsiyum silikatlar (C₂A ve C₃A) ve su (H₂O) reaksiyona girerek (2C₃S+6H→C₂S₂H₃+3CH) ve (2C₂S+4H→C₂S₂H₃+CH) gibi kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) veya kristal yapılu kalsiyum hidroksit (CH) oluşur. Çimentoya sertlik kazandıran esas husus olan bu C-S-H'ların moleküler büyüklükte ve çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 defa daha küçük olmasıdır. Bu kalsiyum hidrat jeline tobermorit adı da verilir. Klinkere alçıtaşı ilave edildiğinde kalsiyum alüminat (C₃A) bileşeni, alçı ile reaksiyona girerek kalsiyum

sülfo alüminatlar (C-S-A) oluşur. Bu kalsiyum sülfo alüminatlar ise kalsiyum alüminat (C₃A)'ların reaksiyon hızını yavaşlatır. Portland çimentosu tanımlarında kullanılan ana bileşenler Çizelge 2.8'de, ana kimyasal reaksiyonlar Çizelge 2.9'da verilmiştir (Weitzman 1990, Korchi ve ark. 1989).

Trikalsiyum alüminat (CaO·Al₂O₃) ve kalsiyum sülfat da denilen alçı (CaSO₄·2H₂O) birleştiğinde Candlot tuzu veya Ettringite adı verilen 3CaO·Al₂O₃·3(CaSO₄)·31H₂O şeklinde bir hidrate tuz meydana gelir. Bu tuz içerdiği çok miktardaki hidrat suyu nedeniyle büyük bir hacim kaplayan kristaldir. Taze halde böyle bir durum sakıncalı değildir. Sertleşmiş çimentoda veya betonda C₃A hidratlaşınca C₃A·6(H₂O) tuzuna dönüşür. Bu hidrate tuz da C₃A gibi sülfat ile birleşip, Candlot tuzuna (Ettringite) dönüşür ve hacmi yaklaşık 200 kat artar. Bu sırada genişleyen tuz, çevresini patlatarak parçalar (Pancoski 1988, Cullinane ve Jones 1989a,b, Jones 1990, Merrit 1993).

Çizelge 2.8. Portland çimentosunun ana bileşenleri

Bileşen İsmi	Formülü	Simge
Dikalsiyum silikat	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum silikat	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Tetrakalsiyum alümino ferrit	CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Trikalsiyum alüminat-celit	CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A

C, Kireç-CaO; S, Silis-SiO₂; A, Alümin-Al₂O₃; F, Demir Oksit-Fe₂O₃

Çizelge 2.9. Portland çimentosundaki ana kimyasal reaksiyonlar*

2(3CaO·SiO ₂)+6 H ₂ O →3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O+3Ca(OH) ₂
2(2CaO·SiO ₂)+4 H ₂ O→3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O+Ca(OH) ₂
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₄ +10 H ₂ O+2Ca(OH) ₂ →6CaO·Al ₂ O ₃ ·12 H ₂ O
3CaO·Al ₂ O ₃ +12 H ₂ O+Ca(OH) ₂ →3CaO·Al ₂ O ₃ ·Ca(OH) ₂ ·12H ₂ O
(3CaO·SiO ₂) Kalsiyum silikat, (3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O) Tobermorite gel, (Ca(OH) ₂) Kalsiyum hidroksit,
(CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₄) Kalsiyum alüminate, (CaO·Al ₂ O ₃ ·12 H ₂ O) Kalsiyum alüminate ferrit
*Weitzman, 1990

2.3.3. Zeolit

Zeolitler çerçeve yapılı, (Al-O-Si) kristal silikatlar grubundandır. Zeolitlerin yapıları boşluklar içermekte olup, bal peteği ve kafes

görünümündedirler. Bu boşluklarda çeşitli katyonlar ve su bulunabilmektedir. Katyonlar genellikle alkali ve toprak alkali metallerdir. Katyonlar zeolitlere zayıf bağlarla bağlı olduklarından iyonlarını kolaylıkla değiştirebilmektedirler. Bu nedenle zeolitler iyon değiştirici olarak kullanılabilirler. Gözeneklerinin içindeki su molekülleri de ısıtılarak kolaylıkla zeolitik yapıyı terk etmekte veya adsorblanmaktadır. Zeolit yapısında “temel yapı birimi” SiO_4 veya AlO_4 dörtyüzlüdür. Bu birimde merkezde Si veya onunla yer değiştirebilen Al atomları, köşelerde ise oksijen atomları vardır.

Belirlenen zeolit minarali sayısı 48’dir. Bunların içinde en iyi bilinenleri: analsim, şabazit, klinoptilolit, eriyonit, ferrierite, heulandite, mordenit, stilbit ve filibsit’dir. Bu doğal zeolitlere ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 2.10’da verilmiştir (TÜBİTAK-MAM, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, 2001).

Zeolitler gerek bilimsel çalışmalar gerekse ticari uygulamalar açısından yer-bilimleri, fizik, kimya, ziraat, hayvancılık, inşaat disiplinlerinin ve hatta tıbbın ilgi alanındadır. Doğal zeolitlerin bazı kullanım alanları aşağıda verilmektedir:

- . Endüstri tipi adsorbanlar
- . Pozolanik çimento ve yapı malzemeleri
- . Toksik atıkların tutulması
- . Atık ve kullanım suyu arıtma
- . Katyon değiştirme özelliklerinde yararlanılarak sulu ortamlardan başta ağır metaller olmak üzere çeşitli katyonların uzaklaştırılması
- . Seçici gaz adsorpsiyonu ile doğal gaz ve metanın SO_2 gibi istenmeyen gazlardan temizlenmesi ve zenginleştirilmesi
- . Radyo aktif iyonların atıklardan temizlenmesidir.

Çizelge 2.10. Zeolit minerallerinin başlıcalarının fiziksel özellikleri

İsim	Formül	Boşluk Kısım (%)	Isıl Kararlılık	İyon Değişim Kapasitesi (meq/g)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Analsim	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆).16H ₂ O	18	Yüksek	4.54	2.24-2.29
Şabazit	Ca ₂ [(AlO ₂) ₄ (SiO ₂) ₈].18H ₂ O	47	Yüksek	3.84	2.05-2.10
Klinoptilolit	(Na ₃ .K ₃)(Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂).24H ₂ O	34	Yüksek	2.16	2.16
Eriyonit	(Na,Ca,K) ₉ (Al ₉ Si ₂₇ O ₇₂).27H ₂ O	35	Yüksek	3.12	2.02-2.08
Ferrierite	(Na ₂ Mg ₂)(Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂).18H ₂ O	28	Yüksek	2.33	-
Heulandite	Ca ₄ (Al ₈ Si ₂₈ O ₇₂).24H ₂ O	39	Düşük	2.91	2.18-2.20
Mordenit	Na ₈ (Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆).24H ₂ O	28	Yüksek	2.29	1.70
Stilbit	Ca ₅ (Al ₁₀ Si ₂₆ O ₇₂).8H ₂ O	39	Düşük	-	1.64
Filibsit	(NaK) ₁₀ (Al ₁₀ Si ₂₂ O ₆₄).20H ₂ O	31	Orta	3.31	1.58

2.4. Geoteknik Özellikler

Stabilizasyon ve solidifikasyon metotlarında kullanılan geoteknik özelliklerin belirlenmesi için bir çok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Hillel (1987), zeminlerde organik kirliliğin engellenmesi ve hareketlerinin kabaca nelere bağlı olduğunu tartışmıştır. Zemindeki kirliliğin hareketi veya bu kirliliğin ilerlemesinin engellenmesi, zeminin yapısı, yeraltı su seviyesi gibi şartlara bağlı olarak değişebileceği belirtmiştir.

Hwang (1988), solidifikasyona tabi tutulan atıkların geoteknik performansı üzerine değerlendirmeler yapmıştır. Stabilize edilen atıkların serbest basınç dirençlerinin en az 50 psi (3.5 kg/cm²) olması gerektiğini, bu atıklar için donma-çözülme ve ıslak/kuru deneylerinin mutlaka yapılması gerektiğini, atığın kuru yoğunluğunun kalite için kontrol parametresi olabileceğini ama dikkat

edilmesi gerektiğini bildirmektedir. Herhangi bir atık, zemin gibi bir özellik gösteriyor ise ilave yüklere karşı dayanabildiği, serbest basınç mukavemetinin kimyasal stabilizasyonu gösteremeyeceği, stabilize edilmiş atığın çevresel şartlara karşı durabilite (donma/çözülme, ıslak-kuru) deneylerinin gerçeklere uygun deneyler olamayacağı, permeabilite ve sızıntı suyu kalitesi atıklar için değerlendirme kriteri olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Poon (1989), çimento esaslı stabilizasyon tarzlarında sızıntı deneylerinin, permeabilite, durabilite ve mukavemet ile değişeceğini, yüksek su/çimento oranının ve yüksek porozitenin permeabiliteyi arttırdığı ve mukavemeti düşürdüğünü belirlemiştir. Permeabilite ve mukavemetin genelde doğru orantılı olduğunu, durabilite ile mukavemet ilişkisinin çok kompleks olduğunu ancak düşük mukavemetin genelde gözenekli bir yapı anlamını taşıdığından durabilitesinin düşük olacağını ve mukavemetteki artış ile durabilitenin artacağını göstermiştir.

Ratnaweera ve Meegoda, (1991), kirlenmiş kil zeminlerin sıkışabilirliği üzerine yaptığı çalışmalarda kaolinit, illit ve monmorillonit zeminler glycerol, propanal ve acetone ile kirletilmiş ve oturma karakteristiklerinin değişimlerine bakılmıştır. Bu deneylerde, kirliliğin artması ile sıkışma indisi olan Cc, önemli miktarda artmıştır. Yine kirlilik konsantrasyonunun artması, likit limiti arttırmış ve plastik limiti azaltmıştır.

Su muhtevası, birim hacim ağırlığı, dane özgül ağırlığı, dane çapı dağılımı, Atterberg kıvam limitleri gibi fiziksel (indeks) özellikler, serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, konsolidasyon deneyi ve permeabilite deneyi gibi mekanik özelliklerdir.

2.4.1. Fiziksel (indeks) özellikler

2.4.1.1. Su muhtevası

Su muhtevası, su ağırlığının dane ağırlığına veya atık içerisindeki toplam katı maddeye oranı olarak tanımlanır. Su muhtevası, oturma (settling), floklanma (flocculating), sızma (filtering) ve absorblama (absorbing) özelliklerinin anlaşılmasında önemlidir. Solidifikasyon/stabilizasyon teknolojisinin seçimi

ve/veya dizaynı veya malzemelerin oranlarının seçimi için öncelikle belirlenmesi gereken bir parametredir (Cullilane ve Jones, 1989b). Çamur (sludge) gibi endüstriyel atıkların katı madde konsantrasyonunun belirlenmesi için su muhtevasının bilinmesi ile çamurun akışkanlık özellikleri ile hacim-kütle ilişkileri belirlenmektedir (Filibeli, 1996). Atıklar için su muhtevası atık yoğunluğuna ve atık içindeki zeminin yapısına bağlıdır. İnce ve kaba daneli malzemelerden oluşan zeminlerde su muhtevası oksijeni ve zemin aktivitesini etkilemektedir. (Tuncan, vd. 1996).

2.4.1.2. Birim hacim ağırlığı

Sıkıştırılmış karışımın yoğunluğu (birim hacim ağırlığı), suyun hareket edebildiği boşlukların büyüklüğünü belirler. Genellikle, ağırlığın hacme oranı olarak belirlenir. Karışım sıkıştırılarak yoğunluk artırılır. Karışıma organik madde ilavesi yoğunluğu azaltır; fakat permeabiliteyi (geçirgenliği) ve gözenekliliği artırır (Filibeli 1996, Yeşilsoy 1994).

2.4.1.3. Dane özgül ağırlığı

Birim hacimdeki atık ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Atık veya zeminlerin dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilebilmesi için gereklidir (Cullilane ve Jones, 1989b).

2.5.1.4. Dane çapı dağılımı

Endüstriyel atıkların dane çapı dağılımı, atıkların iyileştirme tekniklerinin seçimini doğrudan etkilediği gibi, iyileştirme sonrası yeniden kullanılabilirlik alternatiflerinin belirlenebilmesi için de oldukça önemli olmaktadır. İyi derecelenmiş gronülometri eğrisine sahip atık veya zeminler, yüksek mukavemet gibi mekanik özelliklere sahiptir ve stabilizasyon sonu atıkların değerlendirilebilmesi mümkün olmaktadır. İnce dane yapısına sahip atık veya zeminler, genellikle iyi işlenebilme özelliklerine sahiptir ve daha çok absorbent

malzemeler içerdiği için iyi bir kimyasal stabilizasyon sağlamaktadır. Ancak ince dane yapısı nedeni ile düşük mukavemet gibi bazı problemler oluştururlar (Cullilane ve Jones, 1989b).

2.4.1.5. Atterberg kıvam limitleri

Atterberg limitleri, malzemenin plastiklik ve likitlik arasındaki su muhtevalarını belirleyen kıvam limiti deneyleridir. Kohezyonlu zeminlerin kıvamı ve sertlik-yumuşaklık durumunu belirler. Killi bir zeminin kıvamı ilave edilen su miktarı arttıkça, katı bir kıvamdan daha yumuşak bir kıvama gelmektedir. Buna bağlı olarak mühendislik özelliklerinde değişiklikler meydana gelebilmektedir. Atterberg limitleri, ince daneli malzeme içeriğinin sınıflandırılmasında, mukavemet ve şişme karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır (Cullilane ve Jones, 1989b).

2.4.2. Mekanik özellikler

2.4.2.1. Serbest basınç deneyi

Kayma mukavemeti ile herhangi bir noktadaki kayma gerilmesi birbirine eşit olduğunda o noktada kırılma meydana gelir. Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnız düşey yönde yüklemeye tabi tutulmaktadır. Numune kırılıncaya kadar basınçla yüklenir, kırılma olayı yanal şişme veya kayma ile meydana gelir. Serbest basınç deneyinde yükleme hızlıdır ve deney koşulları drenajsız olarak düşünülür. Yanal bir destek olmadan kendi kendini tutabilen zeminler için uygun olduğundan sadece killi zeminlere uygulanır. Deneyde hızlı yükleme yapılarak drenajsız kayma mukavemeti bulunur (Koyuncu, 1998).

Serbest basınç deneyi, atığın zemini veya katı kütle kimyasal olarak nasıl etkilediğini belirlemede kullanılır ve S/S teknolojileri ile iyileştirilmiş zeminlerin sızmaya karşı gösterdiği direnç olarak da kabul edilebilir (Jones, 1990). Serbest basınç deneyi, karışımın pozolanik aktivitesini gösterir.

Mukavemet ölçümü ile atığın permeabilitesi ve durabilitesi hakkında bir fikir edinilebilir.

Serbest basınç mukavemeti, kohezyonlu ve çimento ile karıştırılmış atıklara uygulanmaktadır. Serbest basınç deneyi ile kohezyonlu malzemelerin, taşıma kapasitesi ve kayma mukavemeti belirlenebilir. Kayma mukavemeti de malzemenin nihai taşıma kapasitesi, dolgu stabilitesi ve yanal basınçların belirlenebilmesi için önemlidir (Cullilane ve Jones 1989b, Hwang 1988).

Stabilize edilmiş atıkların birçoğunda 50 psi (3.5 kg/cm²) değerinden daha büyük bir mukavemette olması istenmektedir (Martin ve ark., 1990). Ancak literatürde 200 psi ile 2000 psi (yani 14 kg/cm² ile 140 kg/cm²) arasında değerlere ulaşılmıştır (Thompson ve Malone 1979, EPA 1979). Pozolanik malzemelere bağlı olarak kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin serbest basınç mukavemeti 200 psi ile 2000 psi (yani 14 kg/cm² ile 140 kg/cm²) arasında değişebilmektedir (Pamukçu ve ark., 1989b). İngiltere yol araştırma laboratuvarı kireç ve fly ash ile stabilize edilmiş zeminin minimum 28 günlük mukavemetini 25 psi (1.75 kg/cm²) olarak önerilmektedir (Winterkorn ve Pamukçu, 1991).

2.4.2.2. Permeabilite katsayısı

S/S teknolojilerinin önemli bir amacı da permeabiliteyi azaltarak sızmayı engellemektir. Permeabilite katsayısı kirliliğin fiziksel olarak izole edilme kapasitesini gösterir. Permeabilite azaldığı zaman, sıvıların içsel akış hareketleri sınırlanır (Martin ve ark., 1990). Atık veya zemin içerisindeki asit ve bazlar zemin kütledeki mineraller ve diğer katı maddelerin erimesine sebep olur, boşluklar ve dolayısıyla permeabilite artar. Bir başka görüşe göre kilin permeabilitesi, organik ve inorganik kimyasallar ile değişmez. Inorganik kimyasallar, katyon değerini ve zemin suyunun elektrolit konsantrasyonunda meydana getirdiği değişikliklerle permeabiliteyi artırır (Çinicioğlu, 1997).

Permeabilite, stabilize karışımın suya karşı geçirimsizliğinin ölçülmesi açısından önemli bir parametredir ve kirliliğin fiziksel izolasyonunu gösterir (Jones, 1990). Solidifikasyon/stabilizasyon yönteminde permeabilite katsayısı olan (k) değeri, 10⁻⁴ ile 10⁻⁷ cm/s gibi geniş bir aralıkta değişmektedir (U.S. EPA 540, 1982, Poon, 1989, Thompson ve Malone 1979, Pamukçu ve ark. 1989b).

Birçok stabilize karışımların permeabilitesi 10^{-3} - 10^{-7} cm/sn arasında değişmektedir (Conner, 1990). Atıklar için tipik permeabilite değeri 10^{-3} olarak önerilir (Cullinane ve Jones, 1989b).

2.4.2.3. Konsolidasyon deneyi

Çok yumuşak zeminlerin boşluk oranı-permeabilite ve efektif gerilme-boşluk oranı ilişkilerini elde etmek için bilgisayar kontrollü slurry konsolidometresi geliştirmişler ve zeminin konsolidasyon davranışını teorik kabullere gerek kalmadan belirlenebileceğini belirtmişlerdir (R.E. Martinez, D. Bloomquist ve F.C. Townsend, 1987). H.Koyuncu 1998'de, petrolü sondaj atıklarının kül,kireç ve çimento ilave malzemeleri ile stabilizasyonunda üç set halinde uyguladığı karışımların konsolidasyon deneyinde, kül(%60)+kireç(%30) karışımının daha fazla sıkışma özelliğine sahip olduğunu, kül(%60)+kireç(%20)+çimento(%5) ve kül(%60)+kireç(%20)+çimento(%10) karışımlarının karışımdaki çimentodan dolayı daha az sıkıştığını belirtmiştir.

2.5. Fiziko-Kimyasal Özellikler

Stabilizasyon ve solidifikasyon metotlarında kullanılan fiziko-kimyasal özelliklerin belirlenmesi için bir çok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Kirlenmiş zeminlerde, biyolojik iyileştirme amacıyla ağaç tozu (manure-wood chip) veya kısaca talaş kullanılabilir. Atık yağ ile kirlenmiş ile dizel fuel/ benzin ile kirlenmiş zeminler talaş ile 4:1 ile 3.5:1 oranlarında karıştırılmıştır metal-organik ve oil-organik bileşikleri teşkil ettirilmek amacıyla kirliliklerin azaltılması ve metallerin adsorbe edilmesi sağlanmıştır (Kamnikar, 1992).

Inorganik ve organik zehirli bileşenlerin fiksasyonunda bağlayıcı malzeme olarak tek başına alçı ve/veya portland çimentosu, yüksek fırın cürüfü (blast furnace slag) ve/vaya kireç birlikte kullanılmıştır. Karışımlar üzerinde kimyasal bağları ve reaksiyonlarının nasıl olduğunu araştırmak için de gaz kromatografisi ve spektrometresi ile $Fe_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$ ve $MnSO_4$ miktarları ölçülmüştür. Bulunan neticelerde bu bileşenlerin azaldığı tespit edilmiş

yani stabilizasyonla fiksasyon sağlanmış, sızıntı suyu sonucu oluşan kirlilik önlenmiştir (Hooykaas ve ark., 1993b).

Zehirli atıkların stabilizasyonla fiksasyonunun sağlanması amacıyla, portland çimentosu, yüksek fırın cürufu (blast furnaca slag), kireç, alçı, kömür uçucu külü, çimento fırın tozu (cement kiln dust) kullanılmıştır. Bu bağlayıcılar, kirlenmiş zeminler, sedimentler ve çamurlar (sludges) ile denenmiştir. Deneyler sonucunda, organik ve inorganik bileşenler ile elementlerin sızma suyundaki zehirlilik etkisi önlenmiştir (Hooykaas ve ark., 1993a).

Robert et al., 1993'de, atıksulardan ve kirlenmiş zeminlerden ağır metallerin ayrılması için kimyasal çökeltme (chemical precipitation) tarzları (hidroksit, karbonat veya sülfid ayırma) pıhtılaştırma/ topaklanma (coagulation/flocculation), ion değişimi, çözücüyle çıkarma (solvent extraction), şelatlama ile çıkarma, bileşikleme (complexation), elektrokimyasal operasyon, çimentolaştırma (cementation), membran operasyonu, buharlaştırma, adsorpsiyon, stabilizasyon/solidifikasyon ve vitrifikasyon tarzları gözden geçirilmiş, teknikleri ve tarzları sunulmuştur.

Portland çimentosu atık ve su ile birleştiğinde çimentolaşma reaksiyonları oluşturur. İlk ürün kompozisyon ve yapısı tam olarak belirlenemeyen kolloidal boyutdaki kalsiyum-silika-hidrat jelleridir. Çimento serleştikten sonra, tek bir çimento parçasından ağ gibi birbiri içine geçmiş, ince, yoğun halde bulunan, küçük silikat lifleri, yani Ettringite adı verilen $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3(CaSO_4) \cdot 31H_2O$ şeklinde bir hidrate tuzu oluşur. Bu lifler, atığı veya agregaları birbirine bağlayarak, monolitik (yekpare), kaya benzeri bir kütle oluşturur. Burada sertleşmenin başarısı, sülfatlara, boratlara, tuzlara ve organik bileşenlere bağlıdır. Metal ionları, çimentonun kristal yapılarının içersine alınarak, çözünemeyen katı bir form içersine hapsedilir (EPA 600, 1979).

2.5.1. pH

Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır. pH değeri, ortamda H^+ veya OH^- iyonlarının bulunma

derecesini ifade etmektedir. pH değişimi zemin/su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir (Ergene 1987, Tüzüner 1990).

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyonu etkiler ve asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükle yüklenir. pH değerinin düşük olması kil danesi negatif yüzeylelerini nötrale etmektedir ve elektriksel potansiyeli azaltmaktadır. Zeminin pH değeri metal miktarlarının azaltılmasında önemlidir (Tuncan vd., 1996).

Sızıntı deneylerinde pH 7 değeri büyük ise metal çözünürlükleri azalır, pH değeri 7'nin altında ise artar. Tek bir metal ile stabilize edilmiş atık arasındaki etkileşimler, hidroksil, karbonat, silikat ve diğer kompleks formlara bağlıdır ve bu da metallerin çözünebilirliklerini etkiler (Poon, 1989). pH değerleri mevsimlere göre değişir. Siltlerin pH değeri, killere göre daha düşüktür (Kaçar, 1993).

pH değeri, zemindeki katyon değişim kapasitesini direk olarak etkilemektedir. Kil danelerinin kenarlarından ve organik maddelerden ayrışan H⁺ iyonu ve benzeri yükler atıkların pH değerini etkilemektedir. pH değeri artarsa, ortamın katyon değişim kapasitesi de artmaktadır. Düşük pH seviyelerinde kovalent bağ ile bağlanmış H⁺ ayrışmaz, fakat yüksek pH değerlerinde H⁺ diğer katyonlar ile yer değiştirebilir (Koyuncu, 1998).

Kumlu zeminler yüksek geçirgenliklerinden dolayı kirlilik hareketini kontrol edemezken, killi zeminler düşük geçirgenliklerinden dolayı kirliliği bünyelerinde tutabilmekte ve kirletici sıvıların hareketini büyük ölçüde engelleyebilmektedir. Zeminin pH değeri metal miktarının azaltılmasında oldukça önemlidir. Zeminin pH değeri genellikle kirliliğin zemin içinde ilerlemesini azaltabilmek veya durdurabilmek için minimum 6 ile 8 arasında olmalıdır. Zeminin pH değerini arttırmak için kireç ilavesi yapılması uygundur (Tuncan vd., 1996).

2.5.2. Elektriksel iletkenlik

Su ve atık arasındaki elektriksel iletkenlik, ortamdaki elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüdür. Elektriksel iletkenlik, karışım içerisinde iyon tipi ve sayısı ile ilgili olarak artar. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve

kolloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliği arttırmaktadır (Koyuncu, 1998).

Bir dane içinde elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kütle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir (Das, 1990).

Zemindeki tuz oranı elektriksel iletkenlik ile belirlenir. Elektriksel iletkenlik değeri 4 miliSiemens (4000 mikroSiemens/cm) değerinden fazla ise zemin tuzludur (Tuncan vd., 1996). Bunun yanında, toprak elektriksel iletkenliklere göre çeşitli gruplara ayrılır. Çizelge 2.11'de 25 °C'de ki elektriksel iletkenlik değerlerine göre, toprağın tuzluluk derecesi ve toplam tuz miktarı verilmiştir (Tüzüner, 1990).

Elektriksel iletkenlik iklim ile önemli ölçüde etkilenir. Kuru bölgelerde veya alanlarda yüzey toprağının elektriksel iletkenliği 3-10 miliSiemens/cm arasında değişmektedir. Nemli bölgelerde ise 1 miliSiemens/cm'den azdır. Birçok zeminde çözünebilir hakim tuzlar sodyum, kalsiyum, magnezyum, klorür ve sülfat tuzlarıdır. Azda olsa potasyum, bikarbonat, karbonat ve nitrat da mevcuttur. Karbonat ve bikarbonat zemin solüsyonunun pH değerine bağlıdır. Karbonat pH>9.5 olduğu durumlarda daha fazladır. Zeminin tuzluluğu elektriksel iletkenlik ile belirlenebilir. Elektriksel iletkenlik>4 milimhos/cm ise zemin aşırı tuzludur. Eğer, elektriksel geçirimsizlik < 4 ve pH>8.5 ise zemine alkalın zemin diyebiliriz (API, 1983).

Çizelge 2.11. Toprağın toplam tuz, elektriksel iletkenlik ve bunlara göre tuzluluk derecesi

Elektriksel iletkenlik (miliSiemens/cm)	Toplam Tuz (%)	Tuzluluk Derecesi
0-4	0.00-0.15	Tuzsuz toprak
4-8	0.15-0.35	Hafif tuzlu toprak
8-15	0.35-0.65	Orta dereceli tuzlu toprak
15 den fazla	0.65 den büyük	Çok fazla tuzlu toprak

Teorik olarak çözeltilerin tuz miktarı fazlaştıkça elektrik akımını iletmesi de artar. Bu metodun esası asit, baz ve tuzların sudaki çözeltilerinin elektrik akımını iletmeleri özelliğine dayanmaktadır. Bir tuz çözeltilisine sabit bir

elektromotor kuvveti uygulandığında akım şiddet (I), çözeltinin direnci (R) ile ters orantılı olarak değişebilir. Yani çözeltinin elektrik iletme gücü (Electrical Conductivity) (EC), çözeltinin direnci ile ters orantılıdır. Elektriksel iletkenlik 1 cm² kesitinde ve birbirinden 1 cm uzaklıktaki elektrotlar arasında çözeltinin iletkenliğidir.

$$EC = \frac{1}{R} \quad (2-1)$$

Siemens (S) birimi, Amper/Volt (A/V) olarak veya SI terimlerinde (m⁻²kg⁻¹sn³A²) olarak gösterilmektedir. İletkenlik ölçümünde kullanılan iletkenlik hücreleri iki platin levhadan ibarettir. Elektrot 1 cm² kesitinde yapılır ve birbirlerinden uzaklığı 1 cm'dir. Bu hücredeki çözeltinin iletkenliği öz elektriksel iletkenliktir. Çözeltiler öz elektriksel iletkenlik ile mukayese edilirler. Her zaman tam bu ölçüde elektrot yapmak mümkün olmaz. Bu nedenle çözeltinin öz elektriksel iletkenliğini bulmak için ölçülen iletkenliğin hücre sabiti denilen bir sayı ile çarpılması gerekmektedir. Çünkü yüzey genişliği ve birbirinden uzaklık değişikçe ölçülen iletkenlik değişecektir. Bu durumda,

$$\text{Öz iletkenlik, } EC_{25\text{ }^{\circ}} = k \cdot EC_1 = k \cdot \frac{1}{R} \quad (2-2)$$

EC₁=hücrede ölçülen iletkenlik (25 C°)

k=hücre sabiti

Elektriksel iletkenlik laboratuvarında kimyasal olarak tayin edilen anyonlar ve kationların toplamına eşdeğerdir. Bu metot doğru ve çabuk olarak toprakların tuz konsantrasyonlarını tayin etmede en çok kullanılan bir metottur. Elektriksel iletkenlik Wheatstone köprüsü esasına göre yapılan aletlerle ölçülür. İletkenlik cihazı, bir çözeltide veya doygun çamurda bulunan iyonların elektrik enerjisini iletmesinden yararlanılarak imal edilmiştir. Platin kaplamanın hassasiyeti azalmış ise, yeniden platinle kaplamak sureti ile ömrü uzatılır (Koyuncu, 1998).

2.5.3. Organik madde miktarı (ateşte kayıp miktarı)

Kuru yakma yöntemi ile ateşte kayıp miktarı, atık içerisindeki organik madde miktarının kaba bir ölçüsünü verir. Killere yüksek spesifik yüzey alanlarından dolayı organikleri azaltır. Toprakta Ca^{++} fazlalığı mikrobiyolojik faaliyetleri hızlandırdığından, organik maddenin hızlı ayrışmasına sebep olur (Kantarcı, 1990).

2.5.4. Toplam metal miktarı

Metaller, zemin içindeki kil mineralinin yüzeylerine katyon değişim kapasitesi ile adsorbe olur. Metaller genellikle killere ve organiklere sıkıca bağlıdır. Metal ile kil arasındaki işlemler; metal tipi, zemin tipi, pH ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Düşük katyon değişim kapasitesine sahip topraktaki metal konsantrasyonunun ilerlemesi kolaylıkla gözlenebilir. Toprak pH değerinin ayarlanması ile düşük katyon değişim kapasitesine sahip topraklarda metallerin toprak içinde ilerlemesi durdurulabilir (Das, 1990). Krom, kurşun, çinko ve mangan gibi ağır metaller suda çözünebilmektedir. Katyon değişim kapasitesi değeri metallerin zemin içinde tutulma kapasitesinin bir ölçüsüdür (Conner, 1990).

Topraktaki metaller, bakır, krom, demir, kadmiyum, nikel, arsenik, çinko, baryum, mangan, gümüş, civa, berilyum, kurşun, stronsiyum, vanadyum, selenyum, molibdendir.

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 (Schachtschabel ve ark., 1993).

$Cd \geq Zn \geq Ti > Ni \geq Cu \geq As=Cr \geq Pb \geq Hg$

Toprak çamurunun kral suyu (3 kısım tuz asidi (HCl) ve bir kısım konsantre nitrik asit (HNO₃ ile) analize tabi tutulur. Bu şekilde ağır metallerin % 90'nının çıkartılması mümkündür. Minerallerin kafes yapılarında yer almayan, potansiyel alınabilir ağır metaller 90 dakika çalkayarak 0.1 M-EDTA ile ekstrakte edilerek bulunur (Toprak 1:Çözelti 10).

Çözünmüş ve kolay değişebilir ağır metaller 0.1 M CaCl ile ekstrakte edilerek bulunur. Bu değişebilir metaller, kadmiyum ve çinko için bu değer aynı zamanda bitki için alınabilir miktarı verir. Söz konusu ağır metaller için 0.1 M NaNO₃, 0.1 M NH₄Cl ve 0.1 M NH₄⁻ asetat ile ekstraksiyonda önerilebilir. Çözünmüş ve bu nedenle de yararlanılabilir ve yıkanabilir özellikte zararlı maddelerin belirlenmesi için, toprağın santrifüj edilmesi veya saturasyon ekstraktı çıkarılarak veya 1:3 Toprak:Su çözeltisi ile elde edilebilir.

Inorganik zararlı madde miktarı çoğunlukla toprak örneklerinin metanol, heksan, aseton, toluol gibi organik çözelti ekstraksiyonu ile bulunmaktadır.

Ağır metaller, demir ve manganoksitler, kısmen de kil minerallerinin tabakaları arasına geniş ölçüde difüze olurlar ve geriye dönüşümsüz olarak bağlanırlar. Ağır metaller, topraktaki organik madde ile, metal-organik bağı oluşturur. Orta Avrupa'da toplam ağır metal girdisi ile kirlenen toprakların yıllık kirlenme oranları Çizelge 2.12'de verilmektedir.

Çizelge 2.12. Orta Avrupa'da toprakların yıllık metal kirliliği (gr/m².yıl)

Element	Metal
Arsenik (As)	0.2-7
Kurşun (Pb)	7-240
Kadmiyum (Cd)	0.15-3.5
Krom (Cr ⁺⁶)	0.2-4.7
Bakır(Cu)	1-20
Nikel (Ni)	0.5-15
Çinko (Zn)	10-600
Civa (Hg)	0.02-0.07

Metaller zemin içersindeki kil minerallerinin yüzeylerine katyon değişim kapasitesi ile adsorbe olur. Metaller genellikle organiklere veya kil zeminlere sıkıca bağlıdır. Metal ile zemin arasında kimyasal taşınma ve katyon değişim kapasitesi gibi bazı işlemler meydana gelir. İşlemler zemin tipi-özellikleri, metal

tipi, pH ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenir. Ağır metallere krom, kurşun, mangan ve çinko suda çözünebilmektedir (Koyuncu, 1998).

Metallerin zemin içinde tutulma kapasitesinin bir ölçüsü katyon değişim kapasitesidir. Düşük katyon değişim kapasitesine sahip zeminlerdeki metal konsantrasyonunun ilerlemesi kolaylıkla gözlenebilmektedir. Düşük katyon değişim kapasitesine sahip zeminlerde metallerin zemin içinde ilerlemesi zeminin pH değerinin ayarlanması ile durdurulabilmektedir. Literatürde kirli zeminler için verilen metal miktarları Çizelge A.1 'de, leachate (sızıntı) suyu içindeki organiklerin ve tuzların limitleri Çizelge A.2'de ve leachate (sızıntı) suyu içindeki metallerin limitleri Çizelge A.3'de verilmiştir. Bu çalışmada belirlenen bazı metallerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Kurşun (Pb)

Kurşun elementinin çözünebilirliği zemin içinde bulunan organik madde, fosfat, hidroksit ve sülfat miktarına bağlıdır. Zemin içersindeki bulunan fosfat ve pH değeri azalır, kurşunun çözünebilirliği artar. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içersinde maksimum kurşun miktarı 100 mg/kg, EPA değerlerine göre leachate (sızıntı) suyu içersinde 5 mg/l ve EPA değerlerine göre içme suyunda 0.05 mg/l'dir. Su içersindeki maksimum kurşun miktarı 1 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991). Kurşun kadmiyum ve civaya göre daha az zehirlidir.

Kurşun kadmiyum, çinko ve nikelin tersine toprakta son derece hareketsiz bir elementtir. Kurşunun çözünürlüğü ortamın pH değeri, toplam kurşun içeriği ve diğer maddelerin durumu ile etkilenir. Ortamın pH değeri 5'den büyükse az çözünür. Spesifik adsorbsiyon özelliğinde dolayı kurşun diğer tüm metallere daha kuvvetli olarak toprağa bağlanır.

Krom (Cr)

Krom elementi zeminde diğer metallere daha az miktarda bulunmaktadır ve genellikle endüstride kalay, krom oksit, krom tuzları için

kullanılır. Krom tuzları temizlik solüsyonları ve boyalarda kullanılır. İnorganik bir kimyasaldır ve zemin içersinde en çok çözünebilen metaldir. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içersinde maksimum krom miktarı 100 mg/kg, EPA değerlerine göre leachate (sızıntı) suyu içersinde 5 mg/l ve EPA değerlerine göre içme suyunda 0.05 mg/l'dir. Krom, insanlarda akut ve kronik zehirlenmeye neden olmaktadır. Kromat ve dikromatlar deri zehirlenmesine ve deri bozukluklarına yol açmaktadır.

Nikel (Ni)

Nikel elementinin zemin içinde bulunabilmesi demir hidroksit, Mangan hidroksit ve organik maddelerle mümkündür. Çinko ve bakırdan farklıdır, asit zeminler zemin solüsyonu içindeki nikelin çözünürlüğünü artırır. Toprakta nikel oranı düşüktür. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içersinde maksimum nikel miktarı 100 mg/kg'dir. Su içindeki maksimum nikel miktarı 0.2 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991). Nikelin kanser yapıcı özelliği vardır ve fazla oranda nikel içeren topraklarda bitki zehirlenmesi meydana gelir.

Nikel alınabilirliği pH değeri azalırsa artmakta, kil minerali, demir-oksit ve mangan-oksitlerin artışı ile azalmaktadır. Nikel miktarı yüksek olan topraklarda, kireçleme ile pH değeri 7 dolaylarına getirilmesi, bitkilerin zehirlenmesi önlemektedir (Conner 1990, Schachtschabel 1993, Kaçar 1993, WEF 1993).

Bakır (Cu)

Genellikle mangan ve demir'in hidroksit oksitleriyle bakır elementi meydana gelir. Yeryüzündeki ortalama bakır içeriği 2-40 mg/kg ve kirlenmiş topraklarda 1000 mg/kg'dır. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içersinde maksimum bakır miktarı 100 mg/kg'dir. Su içindeki maksimum nikel miktarı 0.2 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991). Yüzey sularında bulunan bakır bitkiler için zararlıdır ve sudaki canlılar için kuvvetli toksik nitelik taşımaktadır.

Bakır bakır telleri, elektrik iletim telleri ve elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır. Endüstrilerin atıksularında da yığılan tortular üzerindeki değerleri yaklaşık 530 mg/kg kuru ağırlık, aşırı durumlarda da 5300 mg/kg kuru ağırlığa kadar çıkabilmektedir.

pH<5 olduğu durumlarda bakır çözünabilirliği ve alınabilir duruma geçmesi daha belirgin olarak yükselir. Toprağın pH değeri 6'ının üzerine çıkarsa, bakırca zengin kuvvetli asit topraklarda Cu toksitesesi azalmaktadır.

100 mg/kg'dan fazla bakır içeren atıksuların ve arıtma çamurların toprağa verilmesi sınırlandırılmıştır. 100 mg/kg bakır içeriği bulunması durumunda bile, mera otlarında bakır içeriği çok yüksek olur ve koyunlarda zehirleyici etkide bulunur (Conner 1990, Schachtschabel 1993, Kaçar 1993, WEF 1993).

Kadmiyum (Cd)

Ağır bir metaldir ve doğada saf olarak bulunmaz. Genellikle pil, boya ve plastik yapımında ve paslanmayı önlemek amacı ile civatalarda kullanılır. Sigara dumanında oldukça fazla miktarda olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyum, demir ve mangan oksitlerin, klorürlerin ve organik maddelerin bir karışımıdır. Kadmiyumun çözünürlüğü PH değerinin azalması ile artmaktadır. İnorganik bir kimyasaldır. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içersinde maksimum kadmiyum miktarı 3 mg/kg, EPA değerlerine göre leachate (sızıntı) suyu içersinde 1 mg/l ve EPA değerlerine göre 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 değerinde dahi zehirli bir elementtir. Kemik deformasyonuna ve iskelet bozukluğuna neden olmaktadır. Böbreklerde fonksiyon yetersizliğine ve yüksek kan basıncına neden olur. Solunumla fazla alınması sonucu ciğer anfizami hastalığına yol açar. Kanserojen etkili olduğu da tespit edilmiştir.

Kadmiyum, çinko, mangan ve nikel ile hareketli, kolay taşınabilen ve kolay alınabilen bir ağır metaldir. Asidik ortamda, taşınma hızı yüksektir (Conner 1990, Schachtschabel 1993, Kaçar 1993, WEF 1993).

Çinko (Zn)

Çinko tuzlarının zehirliliği oldukça düşüktür. Çinko kirliliği maden operasyonlarından ve galvenize boruların paslanmasından olabilir. Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde maksimum çinko miktarı 300 mg/kg'dır. Çinkonun içme suyu içindeki maksimum değeri 0.5 mg/l olmalıdır (Resmi Gazete, 1991).

Toprakta kation halinde veya mineral bünyesinde bulunmaktadır. Organik madde miktarı fazla ise çinko miktarı da fazla olmaktadır. pH değeri 5.2'den küçük ve 6'dan büyük olursa çinko çözünürlüğü azalmaktadır. Toprak içindeki fazla çinko miktarı bitkilere ve mikroorganizmalara toksik etki yapmaktadır.

Çinko ile kirlenmiş toprakların kireçleme ile pH değerini 7 ve daha yüksek değere çıkarmak gerekmektedir. Ayrıca demir oksitin uygulanması da çinko bağlanmasına etki edebilmektedir. (Conner 1990, Schachtschabel 1993, Kaçar 1993, WEF 1993).

2.6. Çevresel Şartlara Ait Özellikler

Sızıntı deneyi (leachate) gibi çevresel şartlara ait özelliştir.

2.6.1. Sızıntı deneyi (leachate)

Atıklar, doğal çevrede yağmur ve kar sularına maruz kalmaktadır ve bu su ile ıslanarak kimyasal çözünmeye uğramaktadır. Kimyasal olarak kirlenen bu su zemin içerisinde sızarak kirlilik taşınmaktadır. İyi bir atık stabilizasyonunda sızıntı suyunun temizliği önemli bir kriterdir. Bu nedenle atıkların su gibi bir çözücü ile çözünürlüğü, sızıntı deneyleri ile belirlenmektedir (Poon, 1989).

Sızıntı suyunun kalitesi, kirliliğin sabitlendiğinin yani mikrokapsüllemenin gerçekleştirildiğinin göstergesi olmaktadır (Martin ve ark., 1990). Kil ile sızıntı suyu ilişkisinde birtakım etkenler vardır. Bunlar, kilin kimyasal yapısı, minerolojik özellikleri, dokusu, suyun içindeki kimyasalların özellikleri ve kil ile olan davranışı, ısı değişimleri, enerji özellikleri, elektrik

alanları, zeminin yüklenme durumu ve yüklemdeki değişikliklerdir (Çinicioğlu, 1997).

Atıklarda ürünlerden elementlerin sızıntısını etkileyen birçok faktör vardır. Çizelge 2.13'de gösterilen bu faktörlerin etkisi ile sızıntı suyundaki elementlerin özellikleri değişmektedir (Van Der Sloot ve ark., 1989). Literatürdeki sızıntı suyu içindeki organik ve tuzların limitleri Çizelge A.2'de ve sızıntı suyu içindeki metallerin limitleri Çizelge A.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.13. Sızıntı suyunun özelliklerini etkileyen faktörler

Kimyasal Faktörler	Fiziksel Faktörler	Biyolojik Faktörler
Alkalinite (pH'nın yüksek olması metal sızıntısını önemli miktarda azaltır)	Porozite	Sızıntı suyunun organizmalar tarafından kullanılması
Üründeki özel kimyasallar	Boşluk yapısı	Organizmaların ürünü kötüleştirilmesi
Yüzey ve boşluklardaki kimyasal etkileşimler	Su ile olan kesintili veya sürekli kontak durumu	Biyolojik maddeler ile boşlukların tıkanması
Zaman içerisinde çevre kimyasındaki (pH, Redoks) meydana gelen değişimlerin ürünü etkilenmesi	Atık ürünün yüzey/hacim oranı (düşük yüzey/hacim oranında metal çözünürlüğü azalır)	Biyolojik aktivitelerin çevre kimyası ile değişimi (redox)
Yüzeydeki bozulmalar	Donma-çözülme (durabilite) esnasında sıcaklığın dağılımı (ani, yavaş gibi.)	
Boşluk suyundaki özel kimyasallar	Ürün içerisindeki farklı yoğunluklar (betondaki çakıl gibi)	
Ürün içindeki tepki kinetiği (hareketleri)	Atığın minerolojik özellikleri, danenin yapısı ve şekli	
Sızıntı yapacak suyun kimyasal kompozisyonu (yeraltı, yüzey, yağmur suyu vs.)		

2.7. Mikro Yapısal Özellikler

Solidifikasyon/stabilizasyon tarzlarında, çimento ve pozolan özellikleri de karışımların boşluk özelliklerini farklı olarak etkilemektedir. Hidratlanma ve betonlanma sonrasında oluşan küçük ve büyük boşluklar permeabilite, durabilite ve mukavemeti etkiler. Atık ile karıştırılan pozolan ve çimento ile mikro yapıda üç değişik tip boşluk oluşur. Boşluklardan birincisi, kalsiyum-silikat-hidrat jel yapıları içerisinde meydana gelen 0.5-2.5 nonametre (0,0005-0,0025 µm)

boyutundaki küçük boşluklardır. Bu ise katı parçanın toplam porozitesinin %28'sidir. Bu küçük boşluklar mukavemet ve permeabiliteyi az olarak etkilemesine rağmen büzülme ve sünmede önemli olmaktadır. İkinci tip boşluk ise kılcal boşluklardır. Katı parçacıklar tarafından doldurulamayan büyük boşluklar olup oldukça fazladır ve malzemenin mühendislik davranışı açısından önemlidir. Çok iyi hidratlanmış, düşük su/çimento oranına sahip karışımlarda kılcal boşluklar 10 ile 50 nonametre (0,01-0,05 µm) arasında değişir. Fakat yüksek su/çimento oranına sahip karışımlarda 3000 ile 5000 nonametre (3-5 µm) arasında oluşur. Eğer kılcal boşluklar 50 nonametreden büyük olursa mukavemet ve geçirimsizlik için zararlı, olmakta ve eğer 50 nonametreden (0,05µm) küçük olursa sünme ve büzülme için faydalı olmaktadır. Oluşan üçüncü tip boşluk ise hava boşluğudur. Bu boşluk küreseldir ve 0.05'den 0.2 mm (50-200 µm) aralığında olabilir, fakat 3 mm (3000 µm) değerine kadar artabilir. Donma/çözülme mukavemetini azaltan bu boşluklar, mukavemeti ve geçirimsizliği etkiler (Jones, 1990).

Mikro yapıda, atık ile çimento arasında kompozisyon ve yapısı tam olarak belirlenemeyen kolloidal boyuttaki kalsiyum-silika-hidrat jelleri oluşur ve serleştikten sonra, tek bir çimento parçasından ağ gibi birbiri içine geçmiş, ince, yoğun halde bulunan, küçük silikat lifleri, yani Ettringite adı verilen $3CaO.Al_2O_3.3(CaSO_4).31H_2O$ şeklinde bir hidrate tuzu oluşur. Bu lifler, atığı veya agregaları birbirine bağlayarak, monolitik (yekpare), kaya benzeri bir kütle oluşturur. Metal iyonları, çimentonun kristal yapılarının içerisine alınarak, çözünemeyen katı bir form içerisine hapsedilir (EPA 600, 1979).

2.7.1. Scanning (tarama) elektron mikroskobu (SEM)

Zeminin mikro yapısının gözlenmesi için ideal bir alettir. Zemin mikro yapısı ise zemin, atık ve ilave malzeme sistemlerinin fiziko-kimyası ve yapısının bir fonksiyonudur. Mikro-yapı, parçacıkların birleşiminden ibaret değildir, çünkü parçacıkları bir arada tutan kuvvetlerden de oluşmaktadır. Parçalar, domeinler, agregalar, aglomeralar, floklar ve organik bileşiklerden oluşur. Fiziko-kimyasal kuvvetler, kil ve diğer parçaları bir arada tutarlar. Bu mikro yapının gözlenmesi, gözenek boşluklarının belirlenmesi ve X-Ray

(EDS) elemental analizi ile bu parçacıkların kimyasal analizleri yapılabilmektedir. Böylece S/S tarzlarının davranışı gözlenmektedir (Conner, 1990).

Atık ile çimento, kireç gibi ilave bağlayıcı malzemeler arasında oluşan hidrasyon, topaklanma, aglomerasyon gibi reaksiyonlar malzeme özelliklerine göre değişir. Bütün bunların karakteristikleri ve yapıları ancak mikroskopik analizlerden ve SEM'deki elemental analizlerden anlaşılabilir (Shields, 1991).

Scanning elektron mikroskobu bir yüzeyin büyütülmüş şeklini elde edebilmek için kullanılan bir alettir. Scanning elektron mikroskobu ile kil minerolojisi, kil plakalarının yerleşim biçimleri veya kil dokusunun incelenmesi mümkün olmaktadır. Scanning elektron mikroskobu ile numune yüzeyi üzerine elektron bombardımanı yapılmaktadır. Elektronlar kil daneleri gibi katı objeler tarafından dağıtılır ve böylece fotoğraf plakasının üzerine bir gölge düşer (Koyuncu, 1998).

Bir kil numunesinin SEM için hazırlanması, numunenin çatlama kurutulmasını içerir. Çoğu kil zeminler, havada kurutulduğunda ve büzülme ile yapısı değiştiğinde oldukça fazla hacim azalması gösterir. Bundan dolayı kil numunelerin kritik nokta kurutma metodu ile kurutulması hava kurusu, fırın kurusu ve donma/kuruma metoduna göre daha efektif bir metottur (Bennett ve ark., 1977).

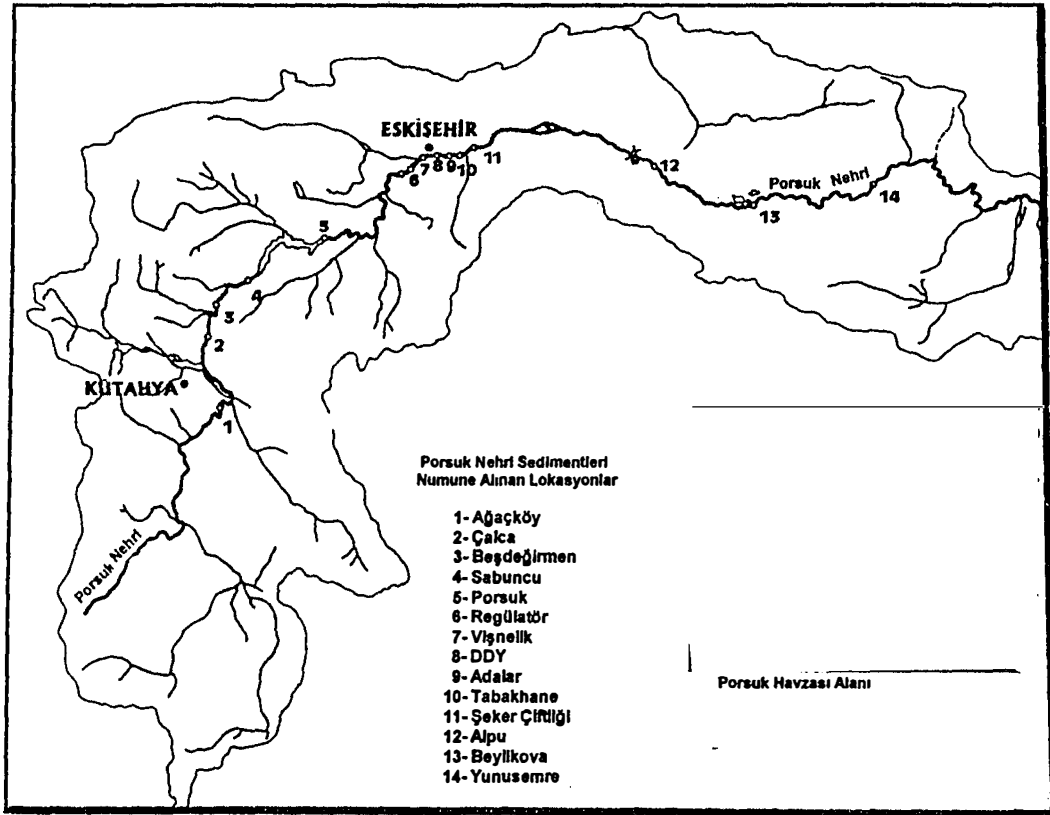
2.7.2. X-Ray elemental analizi

Mikroskoba ilave edilen Enerji Dağılımlı X Işınları Mikro Analiz Spectrometresi aleti ile malzemelerin kimyasal analizleri yapılmaktadır. Bu sistemin çalışma ilkesi, belirli açılardan gelen elektronlar vasıtasıyla malzemeyi bombardıman etme ve gelen yansımaların değerlendirilmesidir. Noktasal analizlerin yanı sıra, geniş yüzeylerde tarama yapmak suretiyle malzemedeki elementlerin dağılımı hakkında bilgi verebilmektedir (Koyuncu, 1998).

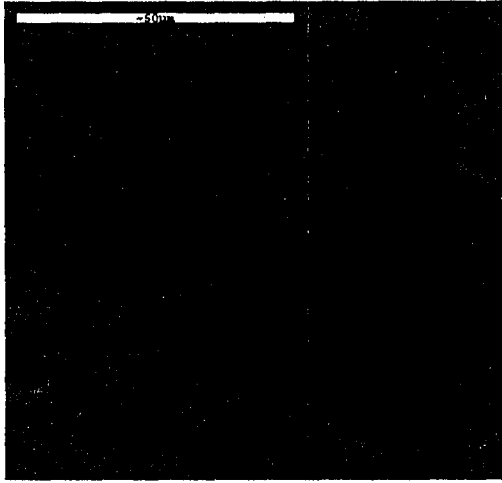
3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

3.1. Sediment Atık Çamuru

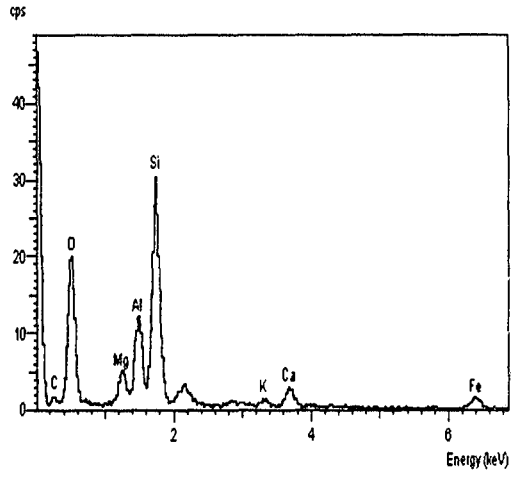
Bu çalışmada, Şekil 3.1’de görülen Porsuk nehri üzerindeki Adalar bölgesi sediment atık çamuru kullanılmıştır. Nehir tabanının 0-40 cm arasındaki derinliklerinden numune alınmıştır. Bunun için yaptırılan uç uca eklenebilen özel bir numune alıcı kullanılmıştır. Kullanılan Adalar sediment atık çamurunun fiziko-kimyasal ve geoteknik parametrelerinde bazıları Çizelge 3.1’de, X-Ray Flourans Elemental Analizi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2’de, toplam metal miktarı değerleri Çizelge 3.3’de ve Şekil 3.2’de Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.1. Porsuk nehri havzası ve sediment toplama istasyon noktaları



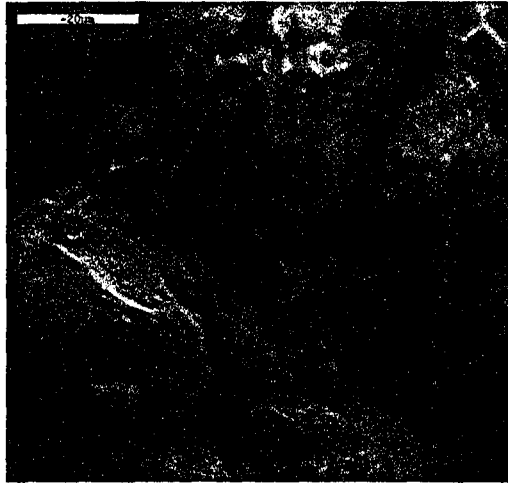
(a) 1200 Büyütme



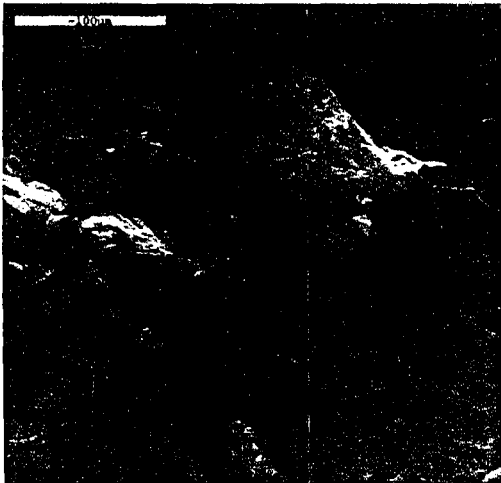
(b) XRF



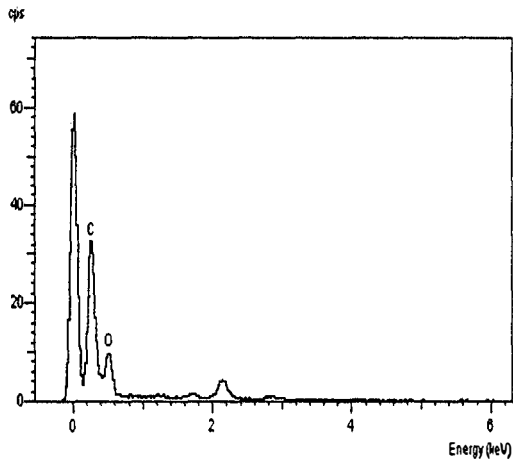
(c) 300 Büyütme



(d) 1500 Büyütme



(e) 300 Büyütme



(f) XRF

Şekil 3.2. Sediment atık çamurlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ve XRF

3.2. Kireç

Bu çalışmada Barkisan S-KK 80-T orijinal torbalanmış Kırşehir kireci kullanılmıştır. Kullanılan toz halindeki bu kireç hiç bir eleme ve kurutma işlemi yapılmadan orijinal olarak ilave edilmiştir. Bu kirecin fiziko-kimyasal ve geoteknik parametrelerinden bazıları Çizelge 3.1’de ve X-Ray Flourans Elemental Analizi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Kireç , çimento v.s. karışımları sonunda oluşan kimyasal reaksiyonlar, genelde katyon değişimi, flokulasyon (topaklanma), aglomerasyon (tane bağlanması), pozolanik veya bağlayıcı reaksiyonları ve karbonatlaşma olarak gruplandırılır.

3.3. Portland Çimentosu

Bu çalışmada standart Tip I sınıfı portland çimentosu kullanılmıştır. Eskişehir Çimento Fabrikasından elde edilen torba çimento hiç bir eleme ve kurutma işlemi yapılamadan kullanılmıştır. İnce daneli ve gri renklidir. Portland çimentosu genellikle inorganik zeminlerin stabilizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan portland çimentosunun fiziko-kimyasal ve geoteknik parametrelerinden bazıları Çizelge 3.1’de ve X-Ray Flourans Elemental Analizi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

3.4. Zeolit

Bu çalışmada Gördes yöresi doğal zeoliti Klinoptilolit kullanılmıştır. Kullanılan toz halindeki bu zeolit hiç bir eleme ve kurutma işlemi yapılmadan orijinal hali ile kullanılmıştır. Kullanılan Klinoptilolit zeolitinin fiziko-kimyasal ve geoteknik parametrelerinden bazıları Çizelge 3.1’de, X-Ray Flourans Elemental Analizi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan ilave malzemelerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri

İlaveler	pH	KDK	Eİ	SM	OMM	DÖA	BHA	Dane Çapı Dağılımı (%)				
		(meq/100g)	(mS/cm)	(%)	(%)		(gr/l)	Kum	Silt	Kil	Cu	Cc
Sediment	7.60	45.72	1.89	147	11.80	2.43	1.24	-	65	36	-	-
Kireç	12.60	16.43	6.29	0.5	24.38	2.45	0.53	5	75	20	6.1	1.8
Çimento	12.63	21.74	4.97	1.9	2.95	3.19	1.01	6	58	36	12	0.8
Zeolit	8.20	165	0.53	0.3	4.39	2.20		-	-	-	-	-

KDK:Katyon Değişim Kapasitesi, Eİ:Elektriksel İletkenlik, SM:Su Muhtevası,

OMM:Organik Madde Miktarı, DÖA:Dane Özgül Ağırlığı, BHA:Birim Hacim Ağırlığı

Çizelge 3.2. Kullanılan ilave malzemelerin XRF elemental analizi ile belirlenen kimyasal bileşimleri

İlaveler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	Mn ₂ O ₃	KK	CO ₂
Sediment	23.35	72.03	1.13	0.03	-	0.21	1.48	-	-	-	-	-	-
Kireç	2.72	0.37	0.25	63.88	4.00	0.01	0.06	0.00	0.02	0.004	0.00	27.48	10.52
Çimento	20.35	5.19	3.34	64.56	1.52	0.07	0.70	0.05	2.04	0.003	0.07	1.26	4.86
Zeolit	71.39	13.30	0.94	2.74	0.71	0.03	3.69	0.47	0.01	0.001	-	6.25	0.96

KK:Kızdırma Kaybı

Çizelge 3.3. Porsuk Nehri sediment atık çamurunun toplam metal miktarı değerleri (mg/kg)

Sediment	Kurşun	Krom	Nikel	Bakır	Kadmium	Çinko
	314	101	102	66	0.20	2448

4. DENEY YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada kullanılan numunelerin geoteknik, fiziko-kimyasal ve mikro yapısal özelliklerini belirleme teknikleri aşağıda verilmiştir.

4.1. Geoteknik Özellikler

Su muhtevası, birim hacim ağırlığı, dane özgül ağırlığı, hidrometre analizi, Atterberg kıvam limitleri gibi fiziksel (indeks) özellikler, serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, permeabilite deneyi ve konsolidasyon deneyi gibi mekanik özellikler tespit edilmiştir.

4.1.1. Fiziksel (indeks) Özellikler

4.1.1.1. Su muhtevası

Deneylerde su muhtevasının belirlenmesinde ASTM D2216-80 (1985) belirtilen, “Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of soil, Rock and Soil Aggregate Mixtures” metod kullanılmıştır. Bu yöntemle hazırlanan numunelerden 50 gram tara ağırlığı belirlenmiş cam kaplara alınmış ve 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutularak su muhtevası saptanmıştır.

4.1.1.2. Birim hacim ağırlığı

Birim hacim ağırlığının saptanmasında bilinen hacim-ağırlık bağıntıları kullanılmıştır. 100 mililitre hacmindeki numunenin ağırlığı belirlenerek birim hacim ağırlığı gr/cm^3 cinsinden saptanmıştır.

4.1.1.3. Dane özgül ağırlığı

Dane özgül ağırlığının tayininde ASTM D854-83 (1985) belirtilen, “Test Method for Specific Gravity of Soil” standardı kullanılmıştır. Deneylerde numuneden 50 gram alınmış ve piknometre aletinde de üç aşamada damıtık su ilavesiyle vakum uygulanarak havası alınmıştır. Bu işlemin ardından piknometreye havası alınmış damıtık su dikkatlice ilave edilerek menüsküs tabanının piknometre üzerinde bulunan işarete kadar gelmesi sağlanmıştır. Deney işlemleri sonunda elde edilen verileri formülasyonda uygulayarak dane özgül ağırlığını gr/cm^3 cinsinden belirlenmiştir.

4.1.1.4. Hidrometre analizi

Hidrometre analizinde ASTM D422-63 (1972) belirtilen, “Method for Particle-Size Analysis of Soil” standardı kullanılmıştır. Bu deneyde numunelerden 200 nolu (0.0075 mm) elekten elenerek 50 gram alınmıştır. Numune bir kap içerisinde 125 ml sodyum hexameta-fosfat çözeltisi ($\text{Na}_6\text{P}_3\text{O}_{10}$) ile karıştırılmış ve 24 saat bekletilmiştir. Bekleme süresinin ardından bir elektrik mikseri kullanılarak hazırlanan numune ve çözelti iyice karıştırılmıştır. Karıştırılan süspansiyon ölçekli cam kap (mezür) içersine dökülmüş ve 100 ml seviyesine kadar üzerine su ilavesi yapılmıştır. Üst tarafı tamamen kapatılan kap süspansiyonun her noktadaki konsantrasyonunun aynı olmasını sağlanana kadar alt-üst edilip karıştırılmıştır. Numunenin düz bir yüzeye konulması ile hidrometre aleti numune içersine bırakıldı ve 5", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1h, 2h, 4h, 8h ve 24h'daki değerleri alınmıştır. Yapılan bu ölçümler sonucunda elde edilen verilerin formülasyonunun ardından granülometre eğrisi çizilerek hazırlanan numunelerdeki kil ve silt oranları yüzde olarak belirlenmiştir.

4.1.1.5. Atterberg kıvam limitleri

Hazırlanan numunelerin likit limit ve plastik limit tayinleri için ASTM D4318-84 (1985) belirtilen “Test Method for Liquid Limit, Plastik Limit, and Plasticity Index of Soils” metodu uygulanmıştır. Likit limitin belirlenmesi için düşen koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. 105°C sıcaklıkta kurutulan numune 40 nolu (0,425 mm) elekten elenmiş ve 250-300 gram alınmıştır. Numune bir kap içersine konarak kademeli olarak su ilave edilmiştir. Her bir aşamada deney sistemindeki kabın içersine yerleştirilmiş 80 gram ağırlığındaki koni kendi ağırlığı ile 5 saniye süre ile numuneye batmıştır. Yapılan işlemler sonucunda deney konisinin 20 mm batmasına karşılık gelen su muhtevası değeri numunenin likit limit değerini vermiştir. Plastik limitin belirlenmesi için likit limit için hazırlanan numuneden bir miktar alınmış ve numune cam levha üzerine konularak avuç içi ile yuvarlanmak kaydıyla 3mm çapında silindir şeklinde çubuklar haline gelip çatlama ve kopmaların olduğu noktada ki su muhtevası saptanmıştır ve plastik limit değeri belirlenmiştir.

4.1.2. Mekanik Özellikler

4.1.2.1. Serbest basınç deneyi

Hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri için ASTM D2166-66 (1979) belirtilen, “Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil” metodu kullanılmıştır. Numune deney aletine yerleştirilmeden önce alt ve üst yüzleri yatay ve düzgün hale getirilmiştir. Serbest basınç aletine düşey olarak yerleştirilmiştir. Deney esnasında numunenin taşıdığı yük azalmaya başladığı zaman veya boy kısalmasının %30 olmasıyla deneye son verilmiştir. Ayrıca numunenin başlangıçtaki su muhtevasında deney süresince değişiklikler olacağından deneyin 10 dakika gibi kısa bir sürede tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Deney sonucunda numunenin kırılmasından sonra Mohr dairesi çizilmiş ve numunenin serbest basınç direnci belirlenmiştir.

4.1.2.2. Permeabilite Katsayısı

Permeabilite katsayısının tayini U.S EPA Method 9100 (1986)'da belirtilen, "Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability" adlı deney işlemine uygun olarak yapılmıştır. Permeabilite deneyinde üç eksenli basınç deney sisteminde olduğu gibi numune yerleştirilmiş düzenekteki numuneye 15 psi (1,07 kg/cm²) sabit çevre basıncı uygulanmıştır. Hidrolik yük 2 psi (0,143 kg/cm²) ve ters basınçta 1 psi (0,071 kg/cm²) olarak uygulanmıştır. Numune tamamen doymun hale getirildikten sonra yani numune içerisine giren ve çıkan suyun eşit bir seviyede olduğu noktada deney son bulmuştur ve permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

4.1.2.3. Konsolidasyon deneyi

Konsolidasyon deneyi için ASTM D2435-80 (1985)'de belirtilen, "Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils" metod kullanılmıştır. Uygulanan bir boyutlu konsolidasyon deneyinde amaç numuneye ait oturmaların, oturma oranlarının belirlenmesidir. Bunun için hazırlanan numune deney aletine yerleştirildikten sonra doymun durumda deneye tabi tutulacağı için hazne su ile doldurulmuştur. Konsolidasyon okumaları belirlenen zaman aralıklarında bilgisayar vasıtasıyla alınmıştır. Deney aletindeki numune 0,25 kg/cm², 0,5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², 8 kg/cm² değerlerinde düşey gerilme uygulanarak yüklenmiş ve boşatılmıştır. Deney sonunda elde edilen datalardan e-logP grafiği çizilmiştir.

4.2. Fiziko - Kimyasal Özellikler

pH, elektriksel iletkenlik (EI), organik madde miktarı (ateşte kayıp miktarı), toplam metal miktarı gibi numunelerin fiziko-kimyasal özellikleri saptanmıştır.

4.2.1. pH

pH deney yönteminde U.S. EPA Method 9045 (1986) 'da belirtilen, “Soil pH” metodu uygulanmıştır. Yaklaşık 20°C oda sıcaklığında hazırlanan numune kurumaya bırakılmıştır. Hava kurusu normuna ulaştıktan sonra numune 40 nolu (0.425 mm) elekten 20 gram elenerek 50 ml su ile cam kap içerisinde 30 dakika süresince ara ara karıştırılmıştır. Karışımın üstü kapatılarak 1 saat sonra pH ölçümü yapılmıştır. Kıyaslama yapabilmek amacıyla Jackson'ın (1958) önerdiği yöntem uygulanmıştır ve üstü kapatılarak 24 saat bekletilen numunenin tekrardan pH ölçümü yapılmıştır. pH değerlerinin ölçümü cam elektrotlu pH metrenin (Cole Parmer) cam kap içersine daldırılmasıyla yapılmıştır.

4.2.2. Elektriksel iletkenlik

Elektriksel iletkenliğin ölçümü için hazırlanan numune yaklaşık 20°C oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Hava kurusu normuna ulaştıktan sonra numune 16 nolu (1.31 mm) elekten 150-250 gram elenerek bir beher içinde doymuş hale gelinceye kadar su ilave edilerek karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra beherin üstü kapatılarak 24 saat bekletilmiş ve bekletilen numunenin içerisine elektrot daldırmak suretiyle elektriksel iletkenlik değerinin ölçümü yapılmıştır (Wilcox,1946;Karakouzian et al., 1996).

4.2.3. Organik madde miktarı (ateşte kayıp miktarı)

Organik madde miktarının belirlenmesi için ilk önce yüksek sıcaklığa dayanıklı kap içerisine hazırlanan numune konulmuş ve 105°C etüvde 24 saat süresince kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından numune 550°C fırında 2 saat süresince yakılmıştır. (Standard Methods, 1993,Horneck et al.,1989) Organik madde miktarının belirlenmesinde aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$D(\%) = (A - B) / A * 100 \quad (4-1)$$

$$E(\%) = (C / A) * 100 \quad (4-2)$$

$$\text{Organik madde miktarı} = 100 - (D + E) \quad (4-3)$$

A= Islak numune ağırlığı

B= 105°C etüvde kurutulmuş numunenin ağırlığı

C= 550°C fırında yakılan numunenin ağırlığı

4.2.4. Spesifik yüzey alanı

Spesifik yüzey alanı değerleri Quantachorone Nova 2200 Gas Sorption Analiz aleti kullanılarak belirlenmiştir. Gas Sorption Analizlerinin temel aldığı teoriler BET ve Langmuir'dir (Brunauer, Emmett & Teller, 1938).

4.2.5. Toplam metal miktarı

Toplam metal miktarının belirlenmesinde uygulanan yöntem U.S. EPA Method 3050, Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, 1986 metoduna uygundur. Bu yöntem için hazırlanan numune 105°C etüvde 24 saat süresince kurutulmuştur. Daha sonra numune 100 nolu (0.150 mm) elekten 10 gram olarak 100 ml konsantre HNO₃ + Konsantre HCL (3:1) asitle karıştırılarak 100°C sıcaklıkta 2 saat süresince yakılmıştır. Yaş yakma denilen bu işlem (Bernas, 1986) sonrasında soğumaya bırakılan karışım gözenek çapı 0.2 mm olan selüloz nitrat kağıdı vasıtasıyla süzümüştür. Krom, arsenik, nikel, baryum ve kadmiyum gibi metal bileşenleri Inductively Coupled Plasma (ICP) aletiyle, bakır, mangan, kurşun, çinko, molibden, kobalt ve demir gibi ağır metal bileşenleri Atomik Absorpsiyon (AA), Perkin Elmer Atomic Absorption Spectrometer 3110 aleti ile belirlenmiştir. Petracourt PFPI Flame Photometer ile sodyum ve potasyum okumaları yapılmıştır.

4.3. Çevresel Şartlara Ait Özellikler

4.3.1. Sızıntı deneyi (leachate)

Leachate yöntemi U.S. EPA Method 9100 (1986)'da belirtilen, “Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability” metoduna uygun olarak yapılmıştır. Bu deneyde numune üç eksenli deneyde olduğu gibi hazırlanmış ve hücre içersine yerleştirilmiştir. Doymun hale gelen numune yani numune içine giren ve çıkan suyun aynı seviyeye ulaşmasından sonra içersinden su geçirilerek çıkan suyu hücre dışındaki bir kaptta toplamak suretiyle sızıntı deneyine (leachate) tabi tutulmuştur. Numuneden 1. 3. ve 5. günlerde ortalama 30 ml sızıntı suyu toplanmıştır. Bu sızıntı sularının daha sonra Perkin Elmer Atomic Absorbtion Spectrometer 3110 aleti ile içindeki metalleri belirlenmiştir.

4.4. Mikro Yapısal Özellikler

4.4.1. Scanning (taramalı) elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları

Uygulanan deneyler sonucunda çekilen Tarama Elektron Fotoğrafları Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında çekilmiştir.

105 C’de 24 saat etüvde kurutulan numuneler Model: B7340, Afar Scentnfiz marka alet vasıtasıyla elektiksel iletkenlik hızlandırılması amacıyla Au-Pd alaşımıyla kaplanmıştır. Kapanmış numunelerin Cam Scan S4 serisi analitik taramalı elektron mikroskobuyla, topografik görüntüleri (ikincil elektron) farklı alanlardan farklı büyütmelede elde edilmiştir.

4.4.2. X-Ray elemental analizi

Deneylerde kullanılan numunelerin XRD analizleri, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında belirlenmiştir. Tuz karakterizasyonu, CuK α radyasyonu ile Rigaku Rint 2000 tip difraktometresi kullanarak XRD'leri çekilmiştir.

5. SEDİMENTLERİN LABORATUVAR MODEL DENEYLERİ

5.1. Karışımlar- Oranlar ve Laboratuvar Model Deneyi

Porsuk Nehri sediment atık çamurunun laboratuvar da stabilizasyonu için yapılan bu bölüm çalışmada kullanılan malzemeler ve oranları Çizelge 5.1'de verilmiştir. İlave malzeme olarak kireç, çimento ve zeolit kullanılmıştır. Sediment atık çamuru ile bu ilave malzemeli karışımlar atık ağırlığının belli bir yüzdesine göre farklı oranlarda homojen olarak karıştırılmıştır.

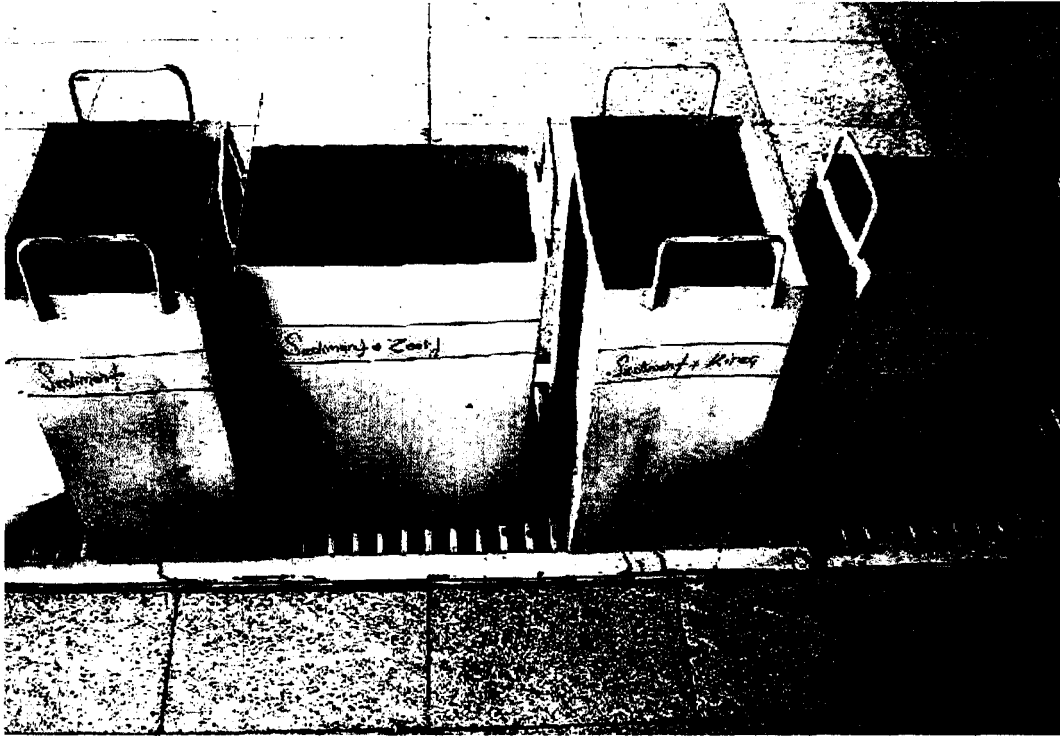
Kullanılan malzemelerin sediment atık çamuru üzerindeki fiziko-kimyasal ve geoteknik etkilerinin net olarak gözlenebilmesi için %147 su muhtevasına sahip sedimentin ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30'u oranlarında tekli karışımlar uygulanmıştır.

Çizelge 5.1. Laboratuvar model deneyi için hazırlanan karışımların oranları ve kısaltmalar

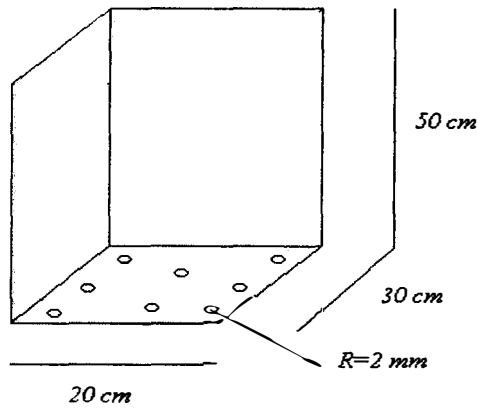
Karışımlar	İlave Malzeme Miktarı (%)			
	%5	%10	%20	%30
Sediment Atık Çamuru	SD	SD	SD	SD
Sediment+Kireç	S5K	S10K	S20K	S30K
Sediment+Çimento	S5Ç	S10Ç	S20Ç	S30Ç
Sediment+Zeolit	S5Z	S10Z	S20Z	S30Z

Laboratuvar model deneyi olarak adlandırılan bu kısımda kireç, çimento ve zeolit ilave malzemeleri %100 sediment atık çamuru ağırlığına göre belirlenen yüzdelerde homojen olarak karıştırılmıştır. Bu karışımlar, en, genişlik, yüksekliği sırasıyla 20 cm, 30 cm, 50 cm olan saç kutular içerisine konulmuştur ve kutuların tabanında eşit aralıklarla açılmış 2 mm çapında delikler bulunmaktadır. Şekil 5.1'de bu bölüm için tasarlanan saç kutuların fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil 5.2'de de saç kutuların şematik gösterimi verilmiştir. Bu çalışmada kutular içerisindeki numunelerin kendi ağırlığı ile zamana bağlı çökmesi gözlenmiştir. Çökmenin son bulması 23 gün sürmüştür. Karışımların zamana bağlı çökme yüzdeleri %5 ve

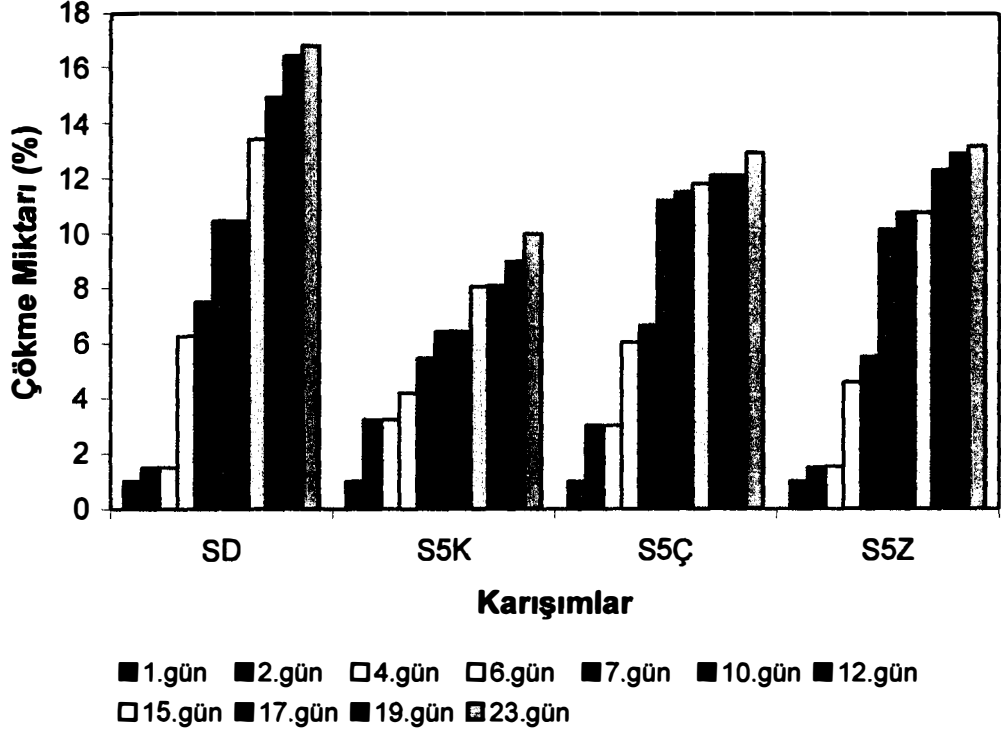
%10 karışımlar için sırasıyla Şekil 5.3’de ve Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu süreç sonrasında çalışmanın kapsamında belirlenen deneyler yapılmıştır.



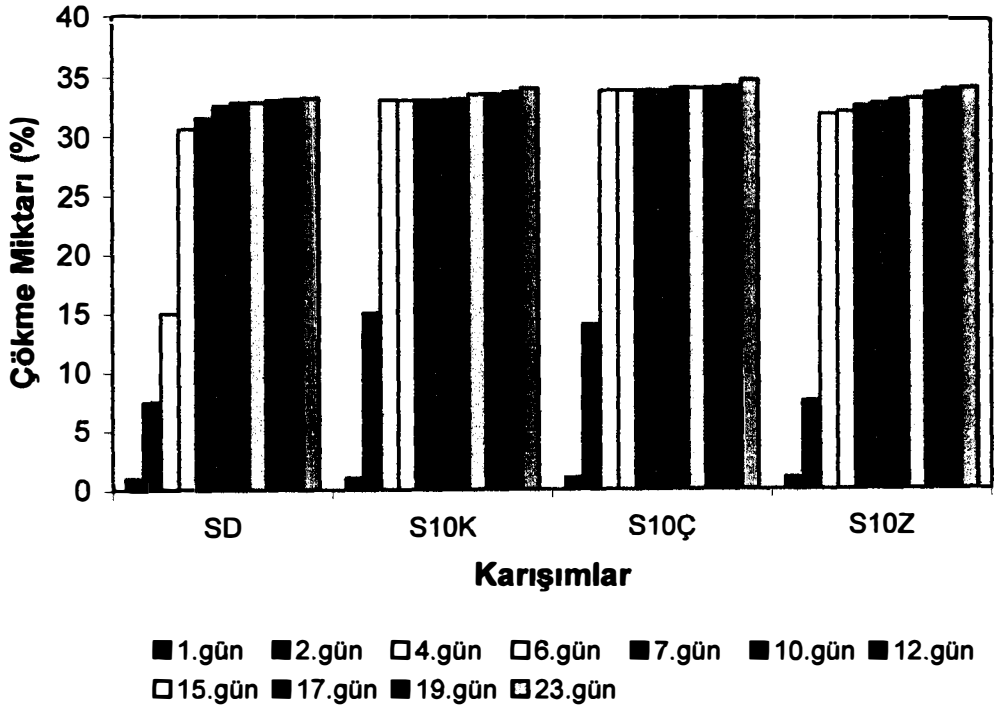
Şekil 5.1. Laboratuvar model deneyi için kullanılan saç kutuların fotoğrafı



Şekil 5.2. Laboratuvar model deneyi için kullanılan saç kutuların şematik gösterimi



Şekil 5.3. %5 Oranındaki karışımların zamana bağlı çökme grafiği



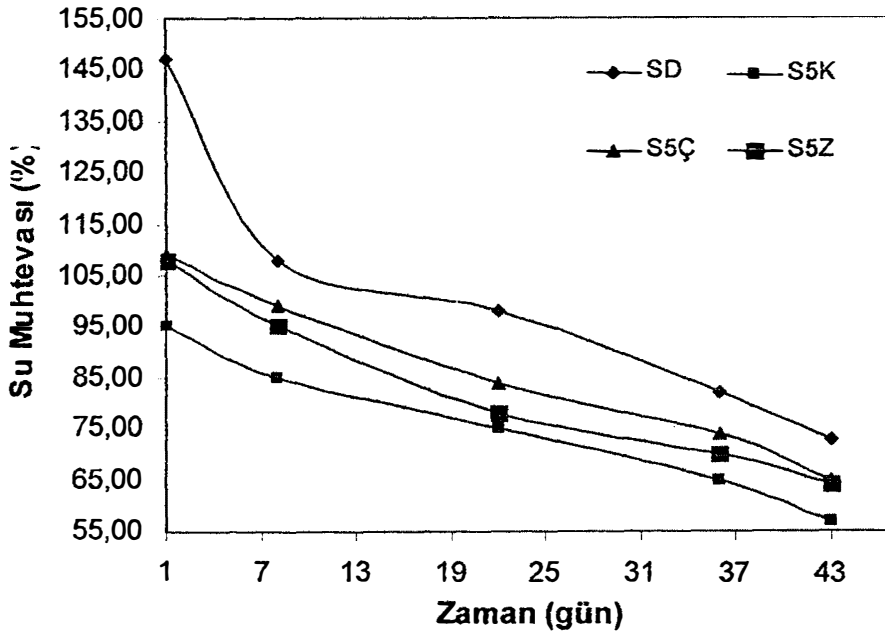
Şekil 5.4. %10 Oranındaki karışımların zamana bağlı çökme grafiği

5.2. Geoteknik Özellikler

5.2.1. Fiziksel (indeks) özellikleri

5.2.1.1. Su muhtevası

Su muhtevası değerleri için ASTM D2216-80 (1985) metodu kullanılmıştır. Kutulara hazırlanan numunelerin 43 gün süresince su muhtevası değerleri alınmıştır. Numunelerden 50 gram alınmış ve 105 °C' de etüvde 24 saat kurutulmuştur. Şekil 5.5'de %5 oranındaki ve Şekil 5.6'da %10 oranındaki su muhtevası değerlerinin grafik gösterimi verilmiştir.

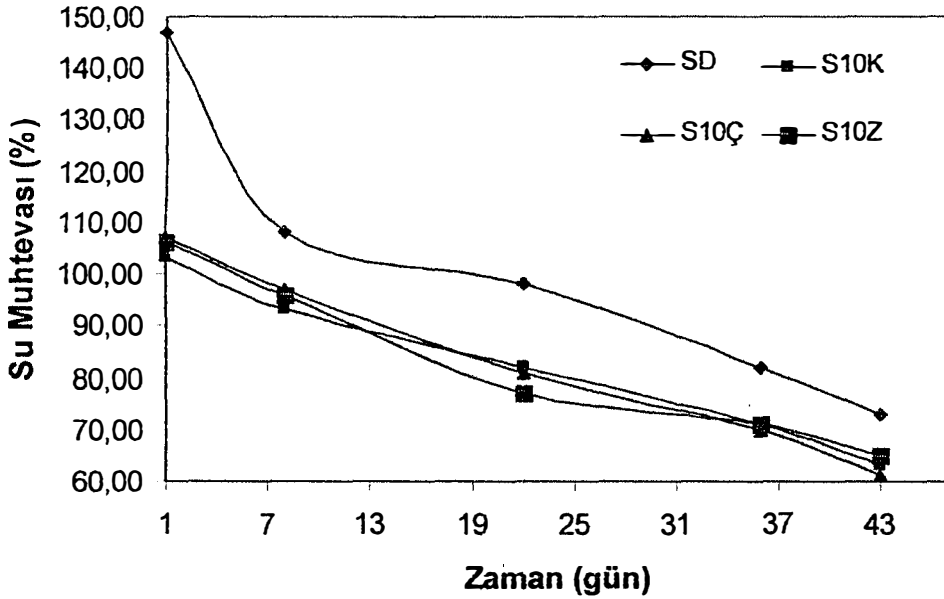


Şekil 5.5. %5 Oranındaki karışımların zamana bağlı su muhtevası değişim grafiği

5.2.1.2. Birim hacim ağırlığı

Karışımların birim hacim ağırlıklarının belirlenmesinde Standart Metod (1985) kullanılmıştır. Belirlenen birim hacim ağırlıkları Çizelge B.1'de verilmiştir. Sediment atık çamurunun 1.240 gr/cm³ değerinde olan birim hacim

ağırlığı kireç, çimento ve zeolitin %5'lik ve %10'luk ilaveleri ile ortalama 1.82 gr/cm³ değerine yükselmiştir. Şekil 5.7'de karışımların grafik gösterimi verilmiştir.



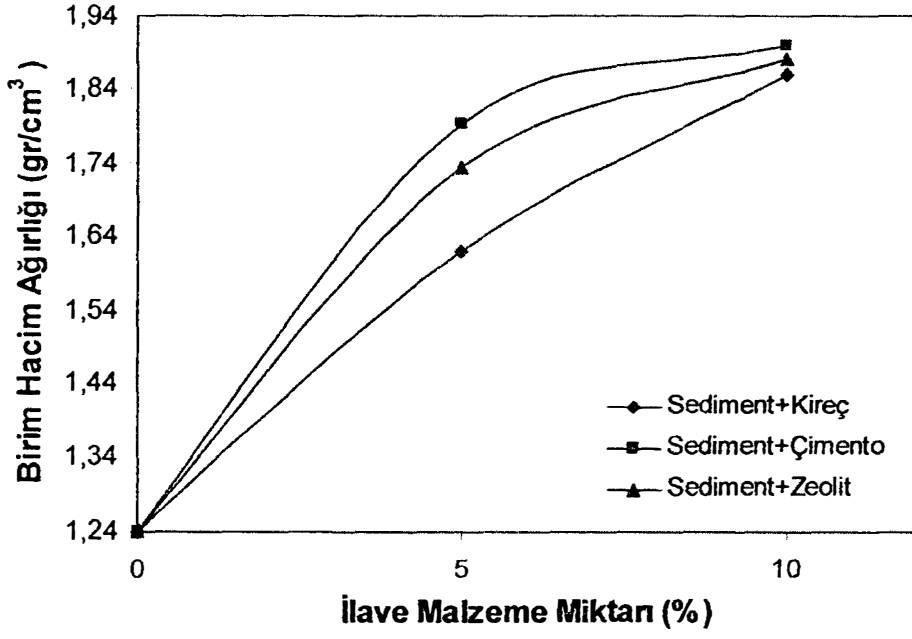
Şekil 5.6. %10 Oranındaki karışımların zamana bağlı su muhtevası değişim grafiği

5.2.1.3. Dane özgül ağırlığı

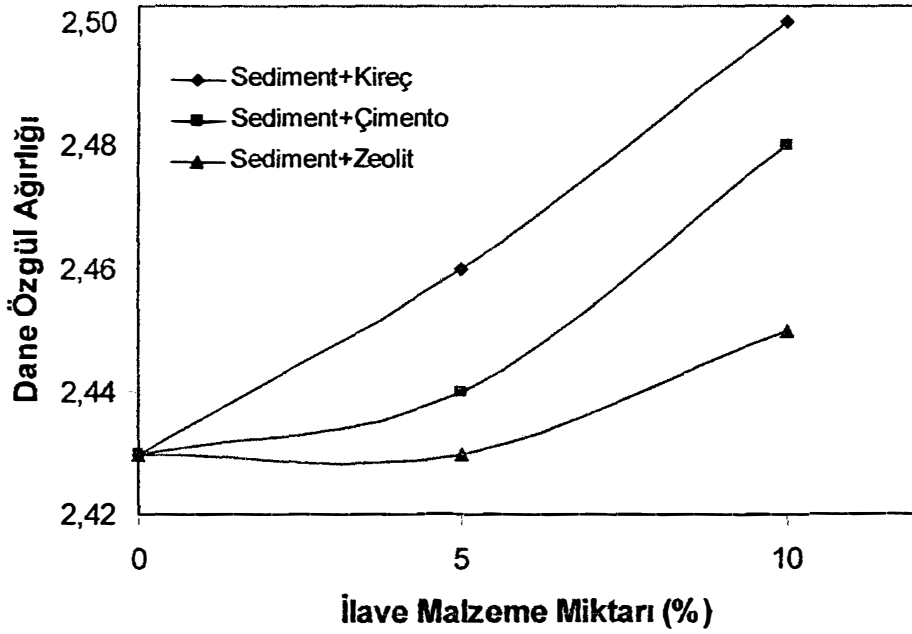
Dane özgül ağırlığının belirlenmesi için ASTM D854-83 (1985) standardı kullanılmıştır. Sediment atık çamurunun 2.43 olan dane özgül ağırlığı kireç, çimento ve zeolit ilave edilen karışımlarda ortalama 2.46 civarında bir artış göstermiştir. Bu değerler Çizelge B.1'de ve grafik gösterimi de Şekil 5.8'de verilmiştir.

5.2.1.4. Hidrometre analizi

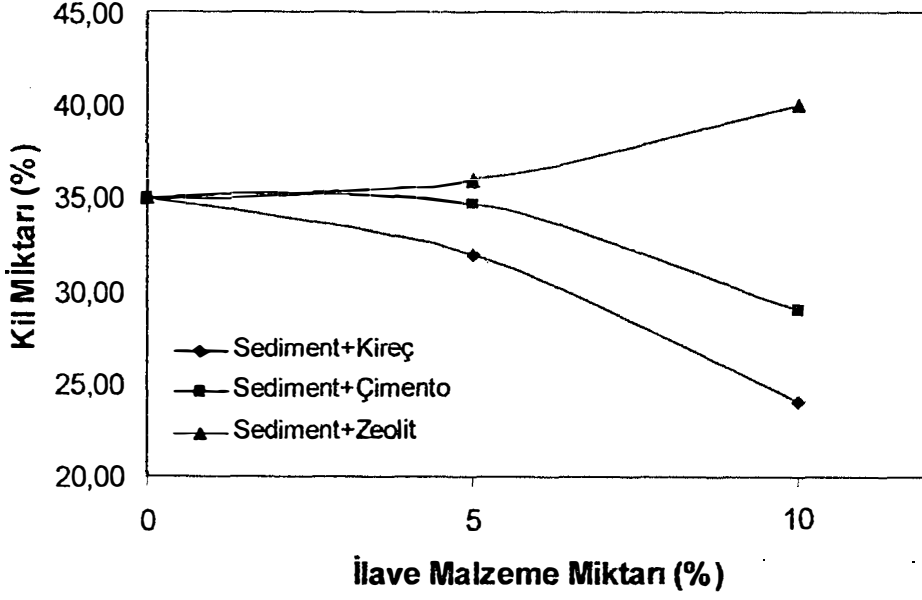
Hidrometre analizi için ASTM D422-63 (1972) standardı kullanılmıştır. Hidrometre analizine ait değerler Çizelge B.1'de, grafik gösterimleri Şekil 5.9 ve 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.7. Karışımların birim hacim ağırlığı değişim grafiği



Şekil 5.8. Karışımların dane özgül ağırlığı değişim grafiği



Şekil 5.9. Karışımların kil miktarı değişim grafiği

5.2.1.5. Atterberg kıvam limitleri

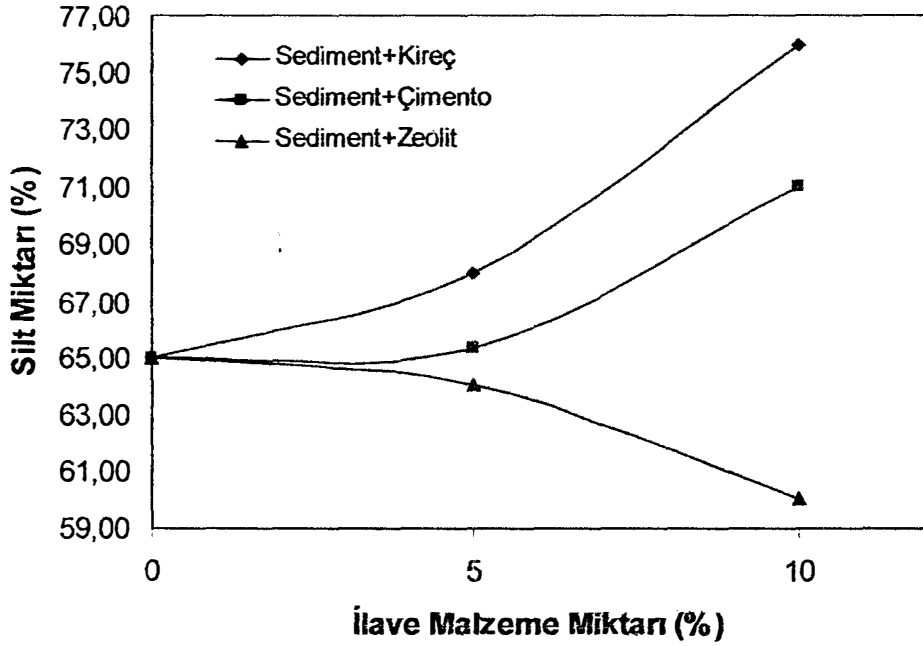
Karışımların likit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesinde ASTM D4318-84 (1985) metodu kullanılmıştır. Sediment atık çamurunun %21 bulunan plastisite indeksi ilave edilen karışımlarda ortalama %11 seviyesinde azalmıştır. Kıvam limitlerinin değerleri Çizelge B.1’de ve grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 verilmiştir. Plastisite indeksinde ki bu azalmanın sebebi sediment atık çamurunun ilave malzemeler ile reaksiyona girerek pozolanik bir yapı oluşturmasıdır. Pozolanik reaksiyon sonucu aglomera yapı oluşmaktadır. Buda dane boyutunu büyütmektedir.

5.2.2.Mekanik Özellikler

5.2.2.1. Serbest basınç mukavemeti

Karışımların serbest basınç mukavemet değerleri için ASTM D2166-66 (1979) metodu kullanılmıştır. Numuneler, çapı 7 cm ve boyu 14 cm olan shellby tüplerinin model deneyi için hazırlanan kutular içine statik olarak batırılması ile

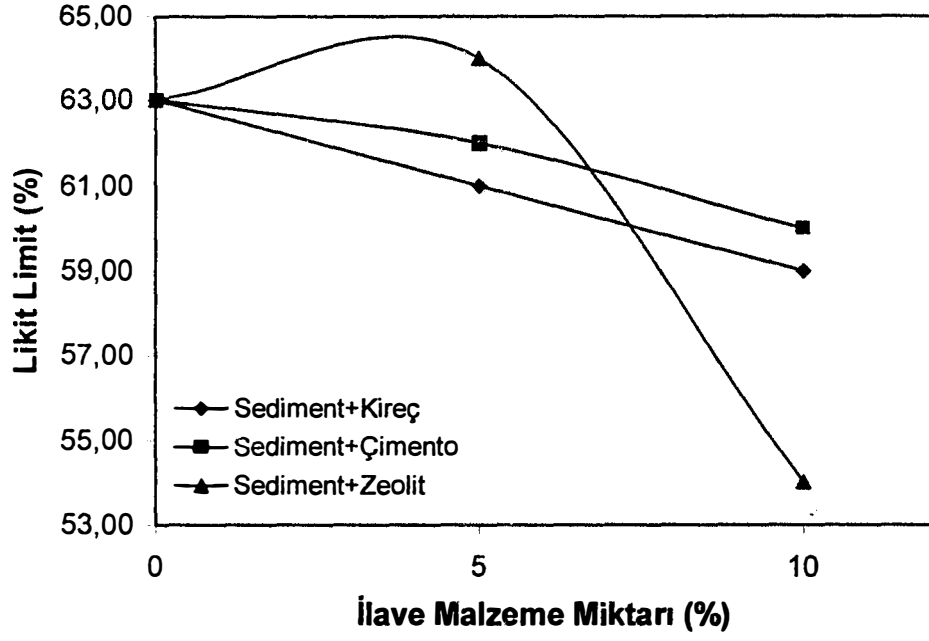
alınmıştır. Serbest basınç direnci değerleri Çizelge 5.2’de ve grafik gösterimi Şekil 5.13’de verilmiştir. Şekil 5.13’de de görüldüğü üzere, SD’nin 0.45 olan serbest basınç direnci ilave malzemeler ile ortalama 0.67 değerine artmıştır. Bu artışın nedeni atıkta ilave malzemeler ile pozzolanik reaksiyon oluşması ve bunun sonucu meydana gelen çimentolaşmadır.



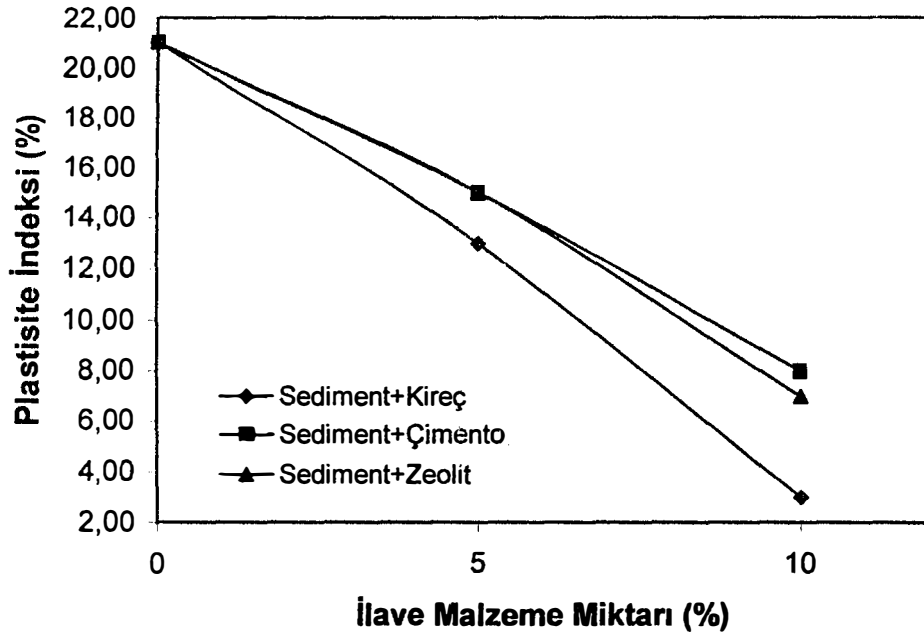
Şekil 5.10. Karışımların silt miktarı değişim grafiği

5.2.2.2. Konsolidasyon

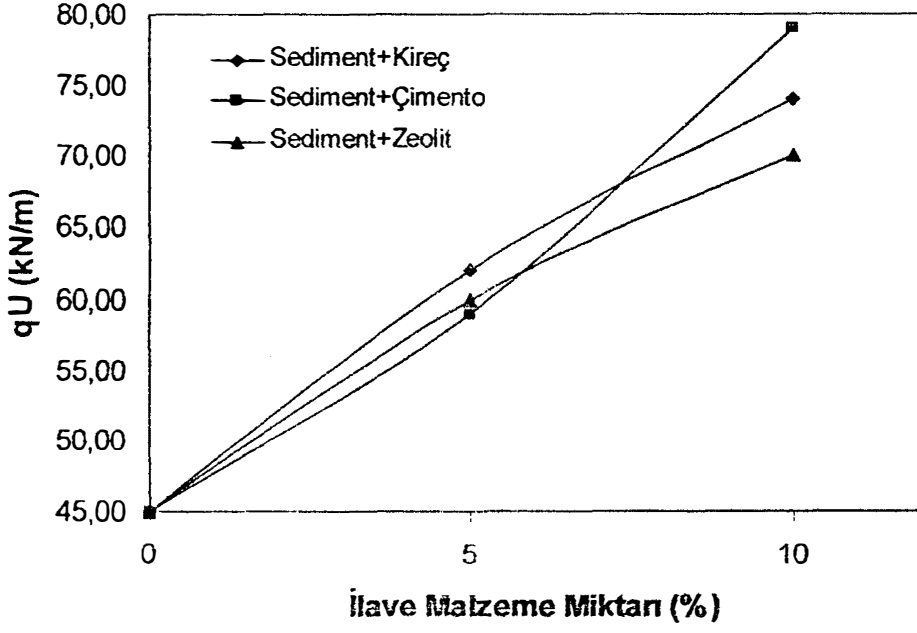
Karışımların konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesinde ASTM D2435-80 (1985) metodu kullanılmıştır. Konsolidasyon numuneleri, model deneyi için hazırlanan kutular içine, ringlerin statik olarak batırılmasıyla alınmıştır. Konsolidasyon deney sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.14’de karışımların C_c ve Şekil 5.15’de C_s grafikleri verilmiştir.



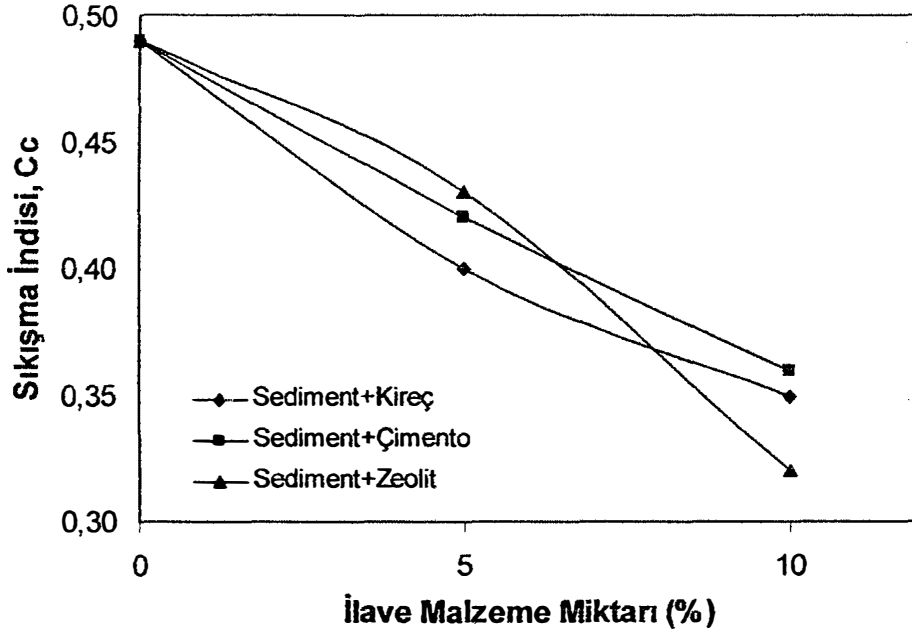
Şekil 5.11. Karışımların likit limit değişim grafiği



Şekil 5.12. Karışımların plastisite indeksi değişim grafiği



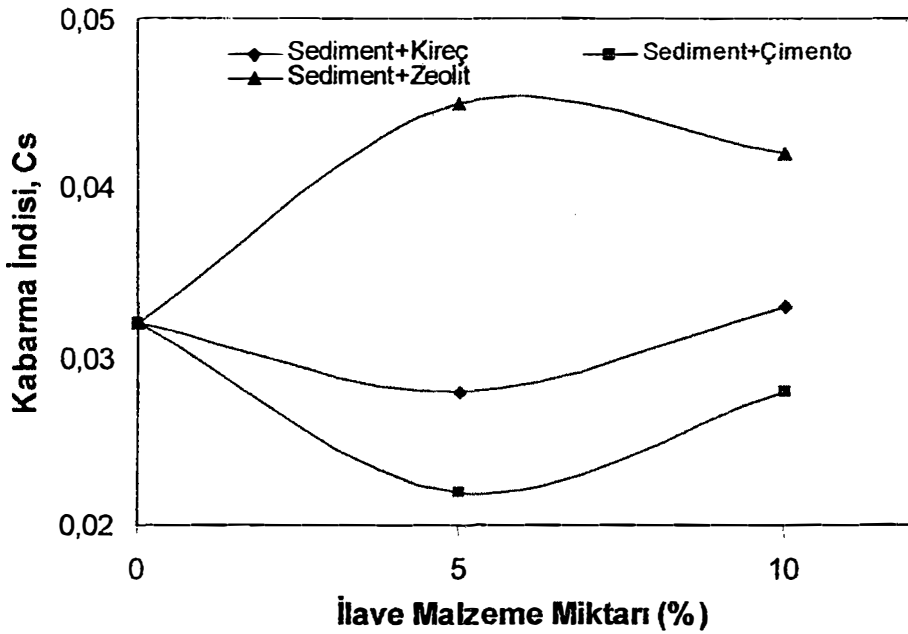
Şekil 5.13. Karışımların serbest basınç mukavemeti değişim grafiği



Şekil 5.14. Karışımların sıkışma indisi (Cc) değişim grafiği

5.2.2.3. Permeabilite katsayısı

Karışımların permeabilitesi (hidrolik geçirgenliği) U.S. EPA Method 9100 (1986) metoduna uygun olarak belirlenmiştir. Karışımların permeabilite katsayıları Çizelge 5.2'de ve Şekil 5.16'de gösterilmiştir. İlave malzemeler ile permeabilite katsayısı azalmıştır. Bunun nedeni ilave malzemeler ile atık danelerinin birbirine sıkıca bağlanarak çimentolaşmanın olmasıdır.



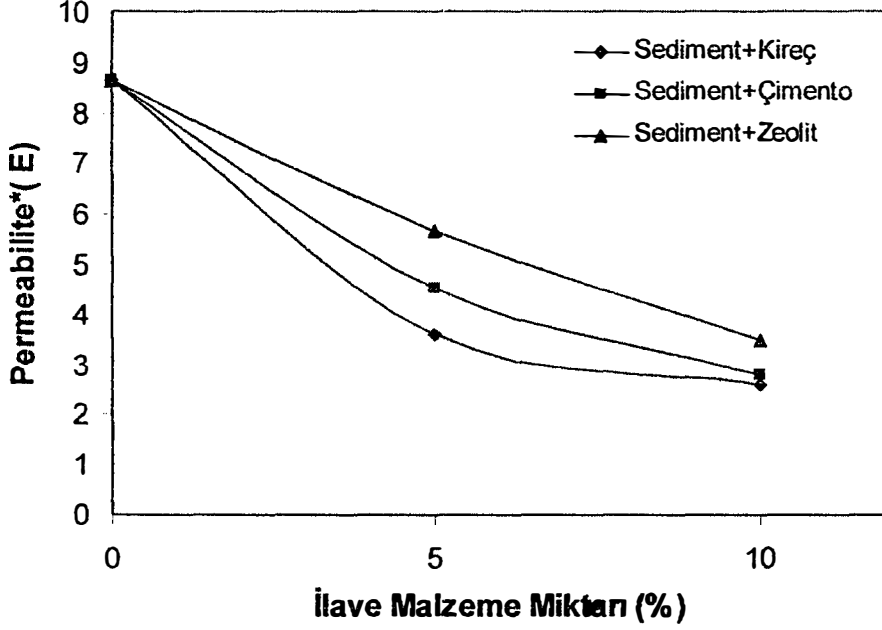
Şekil 5.15. Karışımların kabarma indisi (Cs) değişim grafiği

5.3. Fiziko-Kimyasal Özellikler

5.3.1. pH

pH değerlerini belirlemek için U.S.EPA Method 9045 (1986) metodu kullanılmıştır. pH değerleri malzemelerin ilavesiyle beklenildiği gibi artmıştır. Karışımlara ait pH değerleri Çizelge B.2'de ve Şekil 5.17'de gösterilmiştir. SD'nin pH değeri 7.60 değerinden S5K, S5Ç, S5Z, S10K, S10Ç, S10Z, S20K,

S20Ç, S20Z, S30K, S30Ç ve S30Z için sırasıyla 8.85, 8.29, 7.65, 10.06, 8.81, 7.69, 12.27, 7.85, 9.47, 12.36, 8.12 ve 10.15 değerine artmıştır. pH değerinde ki bu artış ilave malzemelerden dolayı ortamın hidrojen iyonlarının arttığını göstermektedir.



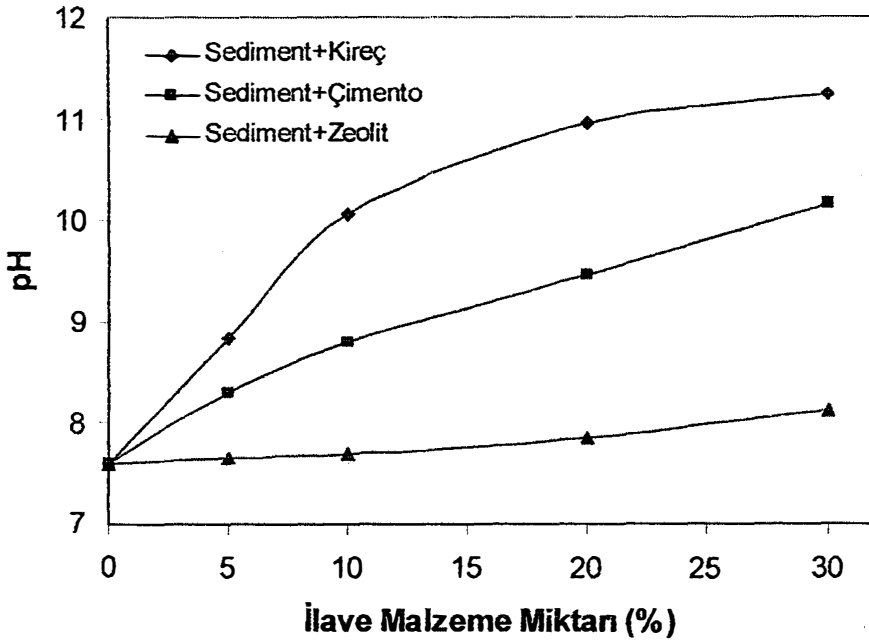
Şekil 5.16. Karışımların permeabilite katsayısı değişim grafiği

Çizelge 5.2. Karışımların mekanik özellikleri

Karışımlar	Serbest Basınç Mukavemeti kg/cm ²	Konsolidasyon Deneyi		Permeabilite Katsayısı k*E ⁻⁷ cm/sn
		Cc	Cs	
SD	0.45	0.49	0.032	8.65
S5K	0.62	0.40	0.028	3.60
S5Ç	0.59	0.42	0.022	4.52
S5Z	0.60	0.43	0.045	5.67
S10K	0.74	0.35	0.033	2.60
S10Ç	0.79	0.36	0.028	2.80
S10Z	0.70	0.32	0.042	3.50

5.3.2. Elektriksel iletkenlik

Elektriksel iletkenlik değerleri Wilcox (1946) ve Karakouzian et al. (1996) tarafından verilen metoda uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 5.18’de gorulduğu gibi sediment atık çamurunun elektriksel iletkenliği 1.89 miliSimens/cm iken S5K, S5 ve S5Z’de ortalama 1.58 miliSimens/cm seviyesine azalmıştır. Elektriksel iletkenlik değerleri izelge B.2’de verilmiştir.

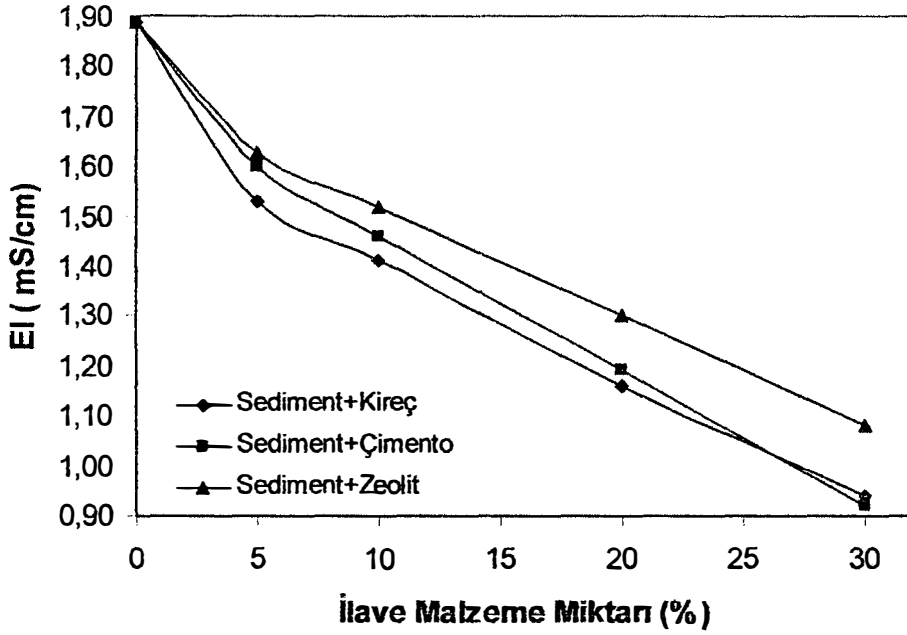


Şekil 5.17. Karışımların pH değişim grafiği

5.3.3. Organik madde miktarı

Organik madde miktarı Standard Methods (1993) ve Horneck et al. (1989) tarafından verilen metotlara uygun olarak belirlenmiştir. Organik madde miktarı ilave malzemeler ile yapılan stabilizasyon sonunda azalmıştır. Şekil 5.19’da gorulduğu gibi, SD’nin %6.80 olan organik madde miktarı kireç, imento ve

zeolit ilave malzemeleri ile ortalama %5.45 değerine düşmüştür. Karışımların organik madde miktarları Çizelge B.2'de verilmiştir.



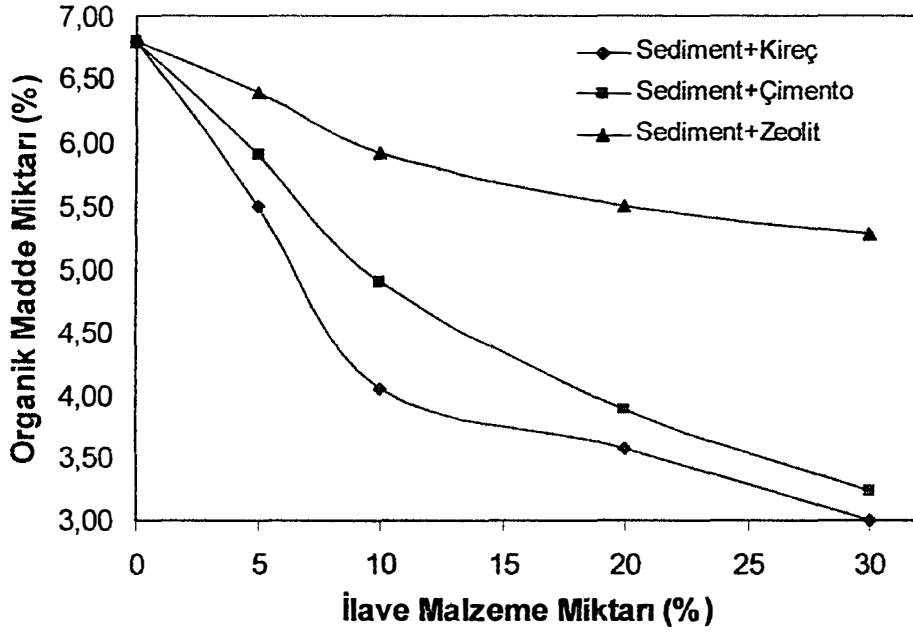
Şekil 5.18. Karışımların elektriksel iletkenlik değişim grafiği

5.3.4. Spesifik yüzey alanı

Sediment atık çamuru stabilizasyonunda yüzey alanı değerini kireç ve çimento ilavesi düşürürken zeolit ilavesi artırmıştır. Numunelerin BET ve Langmuir teorilerine göre spesifik yüzey alanı değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Spesifik yüzey alanı değerleri

Karışımlar	Spesifik Yüzey Alanı (m ² /g)	
	BET	Langmuir
SD	14.326317	23.162514
S30K	9.633423	14.875526
S30Ç	6.816839	11.368625
S30Z	15.984295	25.171282



Şekil 5.19. Karışımların organik madde miktarları değişim grafiği

5.3.5. Toplam metal miktarı

Toplam metal miktarı U.S. EPA Method 3050 (1986) metoduna uygun olarak belirlenmiştir. Bu bölümde kurşun, krom, nikel, bakır ve kadmiyum gibi metallerin özellikleri aşağıda verilmiştir. Toplam metal miktarları Çizelge B.3'de verilmiştir. Toplam metal miktarına ait grafikler Şekil 5.20 - Şekil 5.24 arasında verilmiştir.

Kurşun (Pb)

Stabilizasyon sonunda %10, %20 ve %30'luk karışımlarda kurşun miktarı 100 mg/kg olarak verilen limitlerin oldukça altına çekilmiştir. %5'lik karışımlarda 100 mg/kg olarak verilen limitlerin üzerindedir.

Krom (Cr)

Sediment atık çamurunun 101 mg/kg olan krom miktarı stabilizasyon sonunda tüm karışımlarda 100 mg/kg olarak verilen limitlerin altına çekilmiştir.

Nikel (Ni)

Sediment atık çamurunun 102 mg/kg olan nikel miktarı tüm karışımlarda azalma göstermiştir ve 100mg/kg olarak verilen limitlerin oldukça altındadır.

Bakır (Cu)

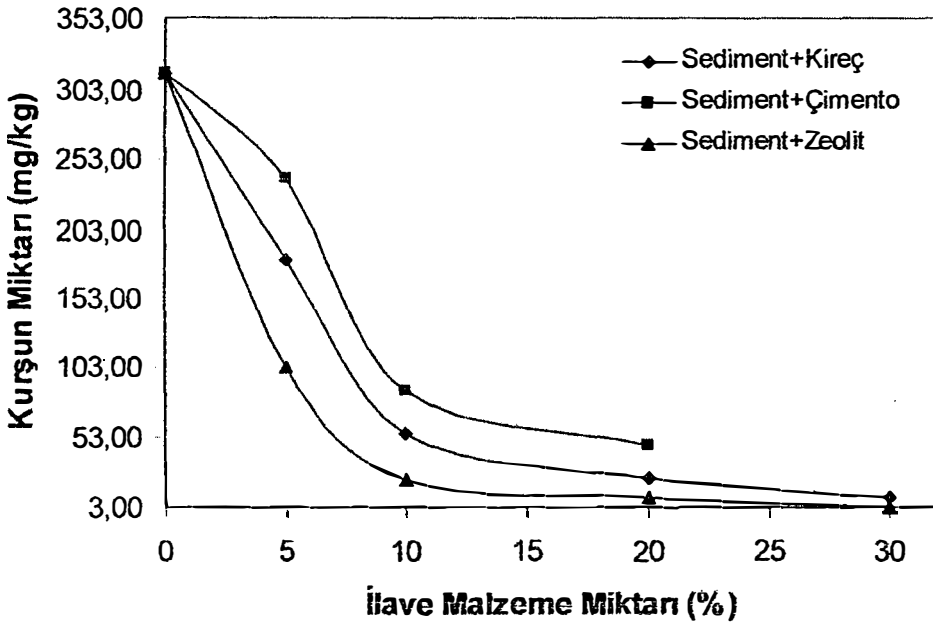
Sediment atık çamuru ve bütün karışımlar için bakır miktarı 100mg/kg olarak verilen limitlerin altındadır.

Kadmiyum (Cd)

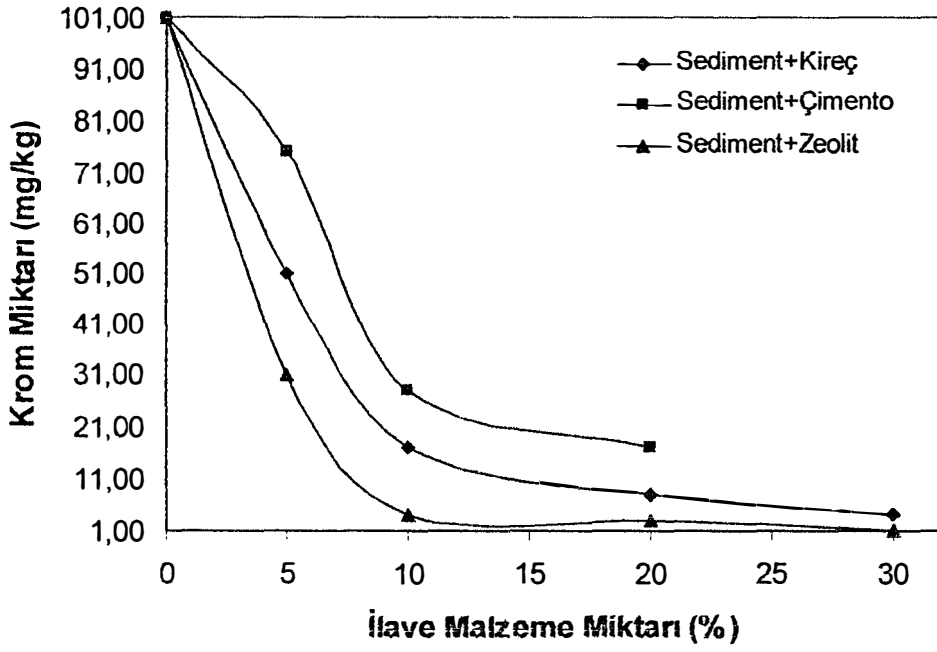
Sediment atık çamuru ve bütün karışımlar için kadmiyum miktarı 3 mg/kg olarak verilen limitlerin altındadır.

Çinko (Zn)

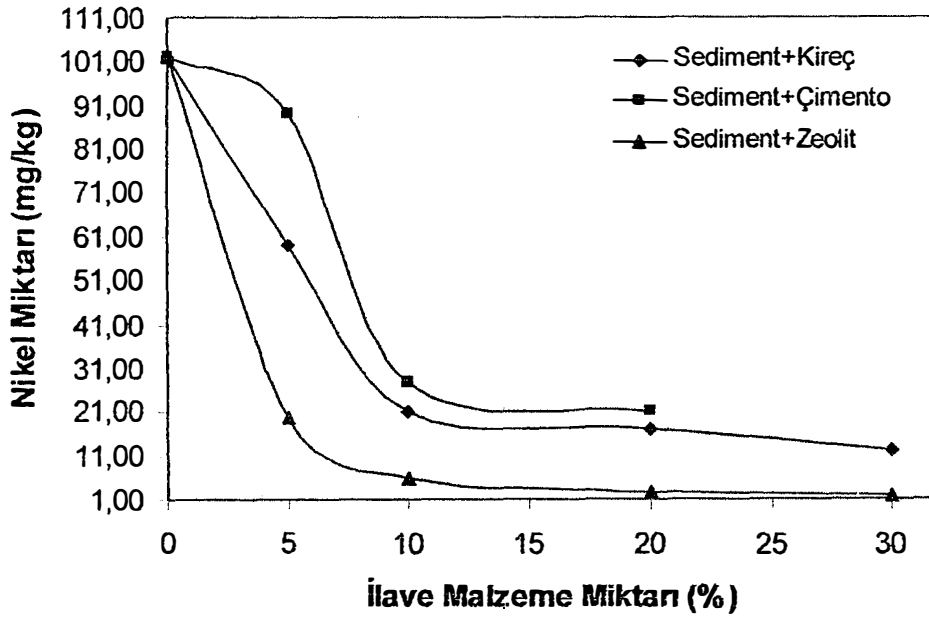
Sediment atık çamurunun 2448 mg/kg olan çinko miktarı S20Z, S30K ve S30Z dışındaki tüm karışımlarda 300 mg/kg olarak verilen limitlerin üzerindedir.



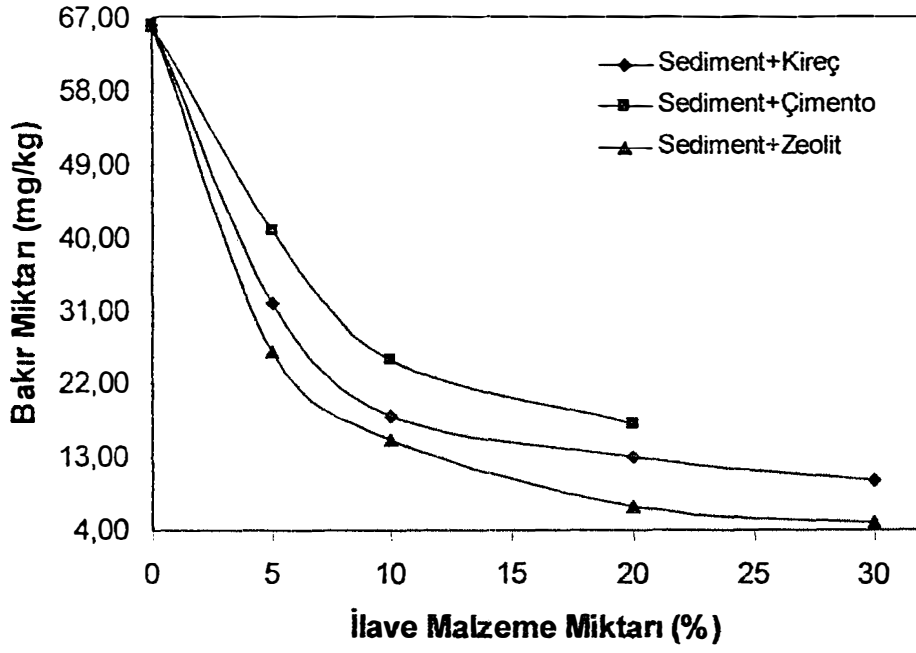
Şekil 5.20. Karışımlar içindeki kurşun miktarı değişimi



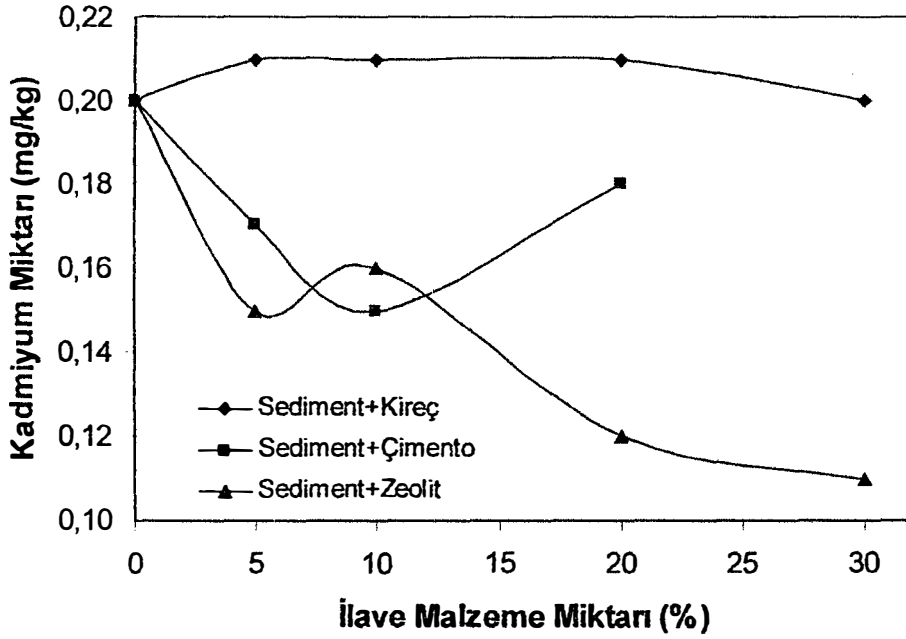
Şekil 5.21. Karışımlar içindeki krom miktarı değişimi



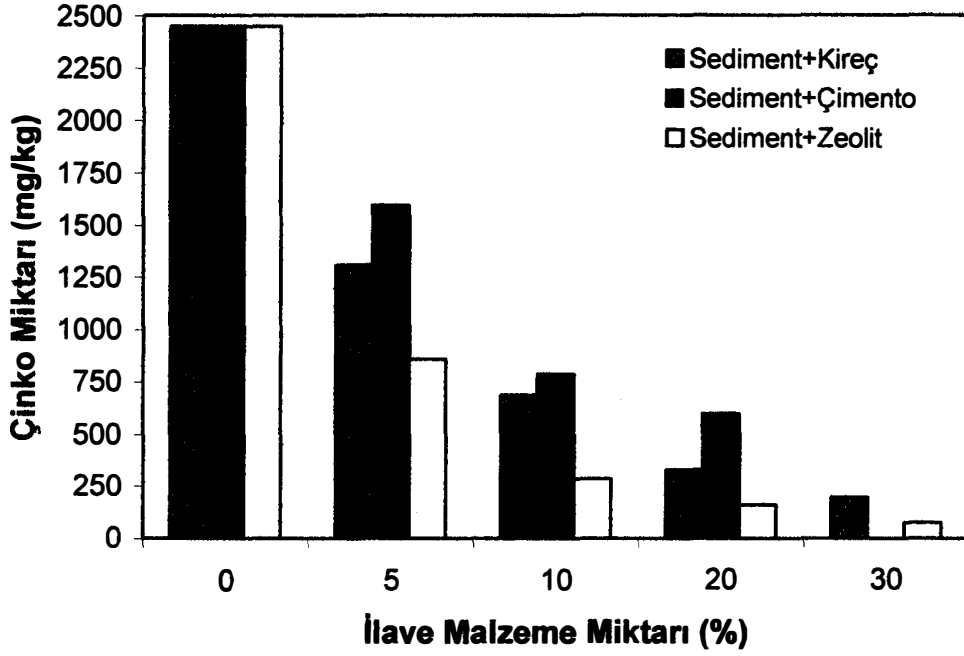
Şekil 5.22. Karışımlar içindeki nikel miktarı değişimi



Şekil 5.23. Karışımlar içindeki bakır miktarı değişimi



Şekil 5.24. Karışımlar içindeki kadmiyum miktarı değişimi



Şekil 5.25. Karışımlar içindeki çinko miktarı değişimi

5.4. Çevresel Şartlara Ait Özellikler

5.4.1. Sızıntı deneyi (leachate)

Karışımların sızıntı deneyi U.S. EPA Method 9100 (1986)'da belirtilen metoda uygun yapılmıştır. Yapılan sızıntı deney sonuçları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Leachate deney sonuçları (ml/l)

Metaller	SD	S5K	S5Ç	S5Z
Kurşun (Pb)	35	14	16	11
Krom (Cr)	2	<1	<1	<1
Çinko (Zn)	73	28	21	14
Nikel (Ni)	2	1	1	<1
Bakır (Cu)	4	<1	2	<1

5.5. Mikro-Yapısal Özellikler

Bu bölümde EDS ile X-Ray analizleri yapılmıştır. Şekil B.1’de SD ile S30K’in, Şekil B.2’de SD ile S30Ç’nun, Şekil B.3’de SD ile S30Z’in karşılaştırılmalı X-Ray analizleri gösterilmiştir. Şekil 5.26 ‘da karışımlara ait Scanning Elektron Microscope (SEM) fotoğrafları görülmektedir. Şekil 5.25 b’de görüldüğü gibi sediment atık çamuru ile kireç arasında bir topaklanma ve yumaklanma yani flokkulasyon meydana gelmektedir.



(a) 2400 Büyütme (SD)



(b) 2480 Büyütme (S10K)



(c) 2400 Büyütme (S10Ç)



(d) 2400 Büyütme (S10Z)

Şekil 5.26. Karışımlara ait SEM fotoğrafları

5.6. Sonuçlar

Laboratuvar model deneyi için yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. Sediment atık çamuruna ilave edilen malzeme miktarı artıka dane çapının artığı ve plastisite indisinde azaldığı grlmektedir.
2. Sediment atık çamuruna ilave edilen madde miktarları %5 ile %30 arasındadır. Tüm karışımlar göz önüne alındığında ilave malzeme yüzdesi artarken; sediment atık çamurundaki pH miktarının da önemli bir şekilde artığı, metal miktarlarının ve iletkenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür.
3. Sediment atık çamuru stabilizasyonunda, spesifik yüzey alanı değerı kireç ve imento katkısı ile azalırken, zeolit ilavesi ile artmıştır.
4. Elektriksel iletkenlik bakımından en iyi iyileşme sırasıyla, %30 kireç (0.94 mS/cm); %30 imento (0.92 mS/cm); %30 zeolit (1.08 mS/cm); %20 kireç (1.16 mS/cm) ve %20 imento (1.19 mS/cm) karışımları ile elde edilmiştir.
5. pH bakımından en yüksek değerler sırasıyla, %30 kireç (11.24); %20 kireç (10.95); %30 kireç (10.15) ve %10 kireç (10.06) karışımları ile elde edilmiştir. pH değerindeki bu artış ilave malzemeler ile ortamın hidrojen iyonlarının artığını göstermektedir.
6. Stabilizasyon sonunda %5 oranında katkılı karışımlar sediment atık çamurunda mevcut kurşun miktarını verilen limitlerin altına indirememişlerdir. %20 zeolit, %30 kireç ve %30 zeolit için çinko miktarı limitlerin altında bulunmuş fakat diğer karışımlarda bu sağlanamamıştır.
7. İlave malzeme miktarı artırıldıka mukavemet artmaktadır. Sediment atık çamuruna göre meydana gelen mukavemet artışı en yüksek %10 imento karışımında olmuştur. Daha sonra, sırasıyla %10 kireç ve %10 zeolit karışımlarında mukavemetin artığı görülmüştür.
8. Sediment atık çamuru stabilizasyonunda ilave malzemeler permeabiliteyi düşürmektedir. Sediment atık çamuruna kıyasla permeabilitesinin en düşük değerde olduğu karışım %10 kireç karışımıdır. Bundan sonraki en büyük azalmalar sırasıyla %10 imento ve %10 zeolit karışımları için

elde edilmiştir. Permeabilite katsayısı kirliliğin fiziksel olarak izole edilme kapasitesidir. Permeabilitenin azalmasıyla sıvuların içsel akış hareketleri sınırlanır. Stabilizasyon için ilave edilen malzemeler karışımın boşluk suyunu azaltarak yoğunluğu artırmaktadır.

9. Karışımlardan elde edilen sızıntı suyu içindeki metal miktarı sızıntı suyu için verilen limit değerlerin altındadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Porsuk nehri sediment atık çamurunun stabilizasyon öncesi ve sonrası geoteknik, fiziko-kimyasal ve mikro-yapısal özellikleri araştırılmıştır.

Geoteknik Özellikler

Yapılan çalışmalar, sediment atık çamuru stabilizasyonu sonunda ilave malzeme miktarının artması ile plastisite indeksinin, permeabilite katsayısının azaldığını, serbest basınç direncinin ve dane çapının arttığını göstermiştir.

Fiziko-Kimyasal Özellikler

İlave malzemelerle stabilize edilen sediment atık çamurunun pH değeri artmakta, toplam metal miktarı, kation değişim kapasitesi ve elektriksel iletkenliği azalmaktadır. Bunun nedeni, ilave edilen bağlayıcı malzemeler, sediment atık çamuru ile reaksiyona girerek yüzey alanlarını örter, birkaç dane bir araya cezbedilerek toplanır ve sonuçta dane çapı büyür. Bunun sonucu spesifik yüzey alanı azalır. Böylece ilave malzemelerin yüzdesinin artırılması ile fiziko-kimyasal özelliklerinin iyileştiği görülmektedir.

Mikro-Yapısal Özellikler

Karışımlar için elde edilen Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) fotoğraflarına göre Porsuk Nehri sediment atık çamurunun ağır metal içeriği özellikle kireç ve çimento ilave malzemeleri tarafından adsorbe edilmekte ve yumaklı bir yapı oluşmaktadır, bu da karışımın mukavemetini artırmaktadır. Stabilizasyon sonucu permeabilite azalmaktadır. Karışımların fiziko-kimyasal ve geoteknik özellikleri mikro-yapıyı etkilemektedir. Karışımların fiziko-kimyasal ve geoteknik özellikleri, elde edilen SEM fotoğrafları ile doğrulanmaktadır.

Çevresel Şartlara ait Özellikler

Stabilizasyon sonucunda, kireç, çimento ve zeolit ilavesiyle sediment atık çamurunun ve karışımların leachate (sızıntı) suyu içerisindeki ağır metal miktarları azalmıştır. Bu değerlerin genelde literatürde belirtilen sınırların altında olduğu belirlenmiştir. Kireç ve çimento kullanılarak stabilize edilmiş sediment atık çamurlarında mukavemet ve permeabilite özelliklerinin zeolite göre daha fazla iyileşmeler olduğu fakat zeolitin metal tutma kapasitesinin diğer ilave malzemelere göre daha yüksek olduğu tesbit edilmiştir.

Çevre ve halk sağlığını tehdit edici bir şekilde hiçbir tedbir alınmadan boş bir alana depolanan inorganik ve organik içeriği olan sediment atık çamurunun kireç, çimento ve zeolit ilave malzemeleri ile stabilizasyonu/solidifikasyonu yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara genel olarak bakıldığında fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerinin iyileştirildiği görülmüştür. Ayrıca bu çalışma, sediment atık çamurlarının iyileştirildikten sonra depolanmaları sonucunda oluşacak geoteknik özelliklerin belirlenmesi konusunda bir ön çalışma olmuştur.

Genel olarak bakıldığında ilave malzeme miktarı arttırıldıkça stabilizasyon daha iyi sonuçlar vermektedir. Ekonomik açıdan düşünüldüğünde %10'luk (kireç, çimento ve zeolit) karışımlar yeterli görülebilir.

Literatürde sediment atık çamurunun seramik malzemesi ve yol dolgusu olarak kullanılabilirliği konusunda çalışmalar yer almaktadır. Bununla ilgili olarak örnek teşkil etmesi amacıyla bu çalışmada, sediment atık çamuru ve stabilize edilen sediment atık çamurunun çim ekiminde kullanılabilirliği hakkında Şekil C.1'de görüldüğü gibi olumlu sonuçlar alınmıştır.

Sediment atık çamurunun stabilizasyon yapılmadan depolanması isteniyor ise bunu gelişigüzel çevreye bırakmak yerine Şekil C.2'de görülen örnekteki gibi çöp depolama alanlarına aktarılması gereklidir. Porsuk nehri sediment atık çamurlarının depolama alanlarının tasarımı konusunda gelecekte çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Resmi Gazete, Çevre Kanunu, 11 Ağustos 1983, Sayı: 18132.
2. KOYUNCU, H., *Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemi İle İyileştirilmiş Petrollü Sondaj Atıklarının Geoteknik, Fiziko-Kimyasal ve Mikro-Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir (1998).
3. ASSINK, J.W., *Physico-Chemical Treatment Methods for Soil Remediation, Contaminated Soil '88* (1988).
4. ASTM, 1985, *Annual Book of ASTM Standards, Natural Building Stones; Soil and Rock*. Vol.04.08, ASTM, Philadelphia (1985).
5. BARTEN, L., *The Influence of Structure on Deformation and Failure in Clay Soil*, Technical Notes (1971).
6. CONNER, J.R., *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*. Van Nostrand Reinhold, New York, 692 p. (1990).
7. PAMUKÇU, S., LYNN, J.B. ve KUGELMAN, I.J., *Solidification and Re-use of Steel Industry Sludge Waste*, Proc. Of the 21 st Mid Atlantic Industrial Waste Conference, eds., Cole, C.A., and Long, D.A., Technomic Pres, Lancaster (1989).
8. PAMUKÇU, S., LYNN, J. B. ve KUGELMAN, I. J., *Solidification and re-use of Steel Industry Sludge Waste*, Proc. Of the 21 st Mid Atlantic Industrial Waste Conference, (Lancaster:Technomic) (1989).
9. WOOD, P., *Innovative Treatment of Contaminated Soils, Waste Management and Recycling International, The International Review of Waste Management, Recycling and Pollution Control Technology*, JOHSON. M., SAMIULLAH, Y., London., (1994).
10. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi, *Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Doğal Zeolitler ve Uygulama Alanları*, Nisan (2001).
11. CANTER, L. W., *Current Practices and Applications of Ground Water and Soil Remediation: Successes and Failures Report on a Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board, Ground Water and Soil Contamination Remediation: Toward Compatible Science, Policy, and Public Perception*, National Academy Pres, (1990).
12. DAS, B., *Principle of Geotechnical Engineering*, Second Edition, (1990).
13. PANCOSKI, S.E., EVANS, J.C., LAGREGA, M.D. ve RAYMOND, A., *Stabilization of Petrochemical Sludge's*, Proceedings of the 20th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, HMCFI, Silver Spring, MD, USA.(1988).
14. HORNECK, D.A., HARTT, J.M., TOPPER, K. ve KOEPESELL, B., *Methods of Soil Analysis Used in the Soil Testing Laboratory at Oregon State University* (1989).
15. KAÇAR, B., *Bitki ve toprağın kimyasal analizleri: Genel Bilgiler*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları (1993).
16. MARTIN, J.P., FRANCIS, J.B. ve ROBINSON, W.T., *Stabilized Petroleum Waste Interaction with Silty Clay Subgrade* (1989).

17. MARTIN, J.P., BROWNING, J.S. ve VAN-KEUREN E.L., *Constitute Behavior of Clay and Pozzolon-Stabilized Hydrocarbon Refining Waste* (1990).
18. Resmi Gazete, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliği, Birinci Bölüm, R.G. No:20814, 14 Mart (1994).
19. Resmi Gazete, T.C. Başbakanlık Personel ve Prensipler Genel Müdürlüğü, 7 Ocak 1991, Sayı: 20748.
20. BURTON, D.J. ve RAVISHANKER, K., *Treatment of Hazardous Petrochemical and Petroleum Wastes Current, New and Emerging Technologies*, Noyes Publication (1989).
21. WILCOX, J.C., *Determination of Electrical Conductivity of Soil Solution*, Science Agronomy (1946).
22. AKALAN, I., *Toprak Bilgisi*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları:1058 (1987).
23. ATANUR, A., *Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki tatbikatı*, Bayındırlık Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No:208 (1973).
24. FILIBELI, A., *Arıtma Çamurlarının İşlenmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Yayın No: 255 (1996).
25. KAMMIKAR, B., *Bioremediation of Contaminated Soil*, Pollution Engineering, 24 (1992).
26. VAN DER SLOOT, H.A., de GROOT, G.J. ve WIJKSTRA, J., *Leaching Characteristics of Construction Materials and Stabilization Products Containing Waste Materials, Environmental Aspects of Stabilization/Solidification of Hazardous and Radiactive Wastes*, ASTM STP 1033, P.L. Cote and T.M. Gilliam, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1989).
27. American Petroleum Institute (API), *Land Treatment Practice in the Petroleum Industry*. API Report, Washington (1983).
28. VAN-KEUREN, E. ve MARTIN, J., *Pilot Field Study of Hydrocarbon Waste Stabilization, Toxic and Hazardous Wastes* (1987).
29. KAMON, M. ve MONTANANANDH, S., *Combining Industrial Wastes With Lime for Soil Stabilization*, Journal of Geotechnical Engineering (1991).
30. BROWN, K.J., *The Preferred Contaminated Soil Remediation Method at Shemya Air Force Base*, Proceeding of the 1991 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (1991).
31. ÇINICIOĞLU, S.F., ÖZTOPRAK, S. ve ŞEN, A.D., *Çöp Sızıntı Suları ve Asidik Çözeltilerin Killerin Geoteknik Özelliklerine Etkisi*, VIII. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 24-27 Eylül (1997).
32. KORCHI, T., GRES, D., BALDWIN, K. ve BISHOP, P., *Evaluating the Freze-Thaw Durability of Portland Cement-Stabilized/Solidified Heavy Metal Waste Using Acoustic Measurements*, 4th International Hazardous Waste Symposium on Environmental Aspects of Stabilization/Solidification of Hazardous and Radioactive Wastes, ASTM STM 1033, Philadelphia (1989).
33. KLEPPE, J.H., OTTEN, M.T. ve FINN, J.T., *Stabilization/Solidification of Metal-Contaminated Soils: Two Case Histories*, Stabilization and

- Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes*, 2^{no} Volume, ASTM STP 1123 (1992).
34. WEITZMAN, L., *Factors for Selecting Appropriate Solidification/Stabilization Methods*, Journal of Hazardous Material (1990).
 35. Water Environment Federation (WEF), *Developing Cleanup Standards for Contaminated Soil, Sediment, and Groundwater: How Clean is Clean?* In Proceeding, Specialty Conference Series, Washington (1993).
 36. MERRIT, S.D., BATCHELOR, LITTLE, D.N ve STIL, MICHAEL., *Applications of Soil and Cement Chemistry to Stabilization/Solidification*, Transportation Research Record, Nat. Research Council, No.1024 (1993).
 37. KELLEMS, B.L., SLOCUM, R.W. ve KAVANAUGH, M.C., *Alternative for Closure of Soil Oily Waste Sites on the North Slope of Alaska, International Arctic Technology Conference Held in Anchorage in Alaska, Society of Petroleum Engineerings* (1991).
 38. WINTERKORN, H.F. ve PAMUKÇU, S., *Soil Stabilization and Grouting. Foundation Engineering Handbook*, Winterkorn, H.F., Fang, H.Y., Van Nostrand Reinhold Company, New York (1991).
 39. KARAKOUZIAN, M., PITCHFORD, A., LEONARD M. ve JOHNSON. B., *Measurement of Soluble Salt Content of Soils From Arid and Semi-Arid Regions*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, No:4, December (1996).
 40. BENNETT, R.H., BRYANT, W.R. ve KELLER, G.H., *Clay Fabric and Geotechnical Properties of Selected Submarine Sediment Cores From the Mississippi Delta*. NOAA, Mississippi (1977).
 41. TUNCAN, A. ve PAMUKÇU, S., *Geotechnical Properties of Petroleum and Sludge Contaminated Marine Sediments*, Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Conference, San Francisco (1992).
 42. TUNCAN, A., TUNCAN, M. ve KOYUNCU, H., *Petrollü sondaj atıklarının Toprakta Meydana Getirdiği Kirliliğin Fiziksel ve Kimyasal Etkilerinin Araştırılması*, TÜBİTAK, Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu, Proje No:KTÇAG-136, Nisan (1996).
 43. TOLMAN, A.L., BALLESTERO, A.P., BECK, W.W., EMRICH, G.H. ve MARTIN, A.W., *Guidance Manual for Minimizing Pollution From Waste Disposal Sites*, Municipal Environmental Research Laboratory Office of Research and Development, EPA 600/2-78-142 (1978).
 44. SCAHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.P., BRUMMER, G. ve HARTGE, K.H. (Çev:Kaya, Z., Gök, M. ve Kaptan, H.) *Toprak Bilimi*, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Genel Yayın No:73,Ders Kitapları No:16, Adana (1993).
 45. RATNAWEERA, P. ve MEEGODA, N.J., *The Compressibility Clay Soils, An Experimental Study*, New Jersey Institute of Technology, Dept. Of Civil and Environmental Engineering, Newark (1991).
 46. U.S. EPA Method 9100, *Physical/chemical Methods., Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability, Triaxial-Cell Method With Back Pressure, Test Methods for Evaluating Solid Waste*, (SW-846), Vol's. IA, IB, IC and II., Third

Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1. Office of Solid Waste and Emergency Response, WashingtonDC. 20460, September, (1986).

47. U.S. EPA Method 9045, *Physical/Chemical Methods.,Soil Ph, Test Methods for Evaluating Solid Waste*, (SW-846), Vol's. IA,IB,IC and II., Third Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1, Office of Solid Waste and Emergency Responce, Washington, DC. 20460, September, (1986).
48. U.S. EPA Method 9081, *Physical/Chemical Methods., Cation-Exchange Capacity of Soils (Sodium Acetate), Test Methods for Evaluating Solid Waste*, (SW-846), Vol's. IA,IB,IC and II., Third Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1, Office of Solid Waste and Emergency Responce, Washington, DC. 20460, September, (1986).
49. U.S. EPA Method 3540, *Physical/Chemical Methods., Soxhlet Extraction, Test Methods for Evaluating Solid Waste*, (SW-846), Vol's. IA,IB,IC and II., Third Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1, Office of Solid Waste and Emergency Responce, Washington, DC. 20460, September, (1986).
50. TÜZÜNER, A., *Toprak ve Su Analiz laboratuarları El Kitabı*, T.C. Tarım Orman ve Köyişleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara (1990).
51. HWANG, D., *Geotechnical Performance Evaluation of Solidified Wastes*, Proceedings of the 20th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference (1988).
52. HOOYKAAS, C.W. ve NEWTON, J.P., *Fixiant for Immobilization of Toxic Wastes*, Eur. Pat. Appl. Ep535,758 (1993).
53. HOOYKAAS, C.W. ve NEWTON, J.P., *Mixed Organic and Inorganic Contaminated Materials and Its use*, Eur. Pat. Appl. Ep535,757 (1993).
54. HILLEL, D., *Movement and Retention of Organic in Soil: A Review and a Critique of Modeling, The Proceedings of the Second National Conference on the Environmental and Public Health Effects of Soils Contaminated With Petroleum Contaminated With Petroleum Products, Petroleum Contaminated Soils*, Vol. I, University of Massachusetts, Lewis Publishers (1987).
55. KAMPBELL, D.H., WILSON, J.T.ve OSTENDORF, D.W., *Simplified Soil Gas Sensing Techniques for Plume Mapping and Remediation Monitoring, The Proceedings of a Conference on Hydrocarbon Contaminated Soils*, Vol. III., University of Massachusetts, Amherts,Lewis Publishers (1989).
56. Enviromental Protection Agency (EPA), *Survey of Stabilization/Solidification Technology for Hazardaus Industrial Wastes*, Municipal Environmental Research Laboratory Office of Research Development U.S. Enviromental Protection Agency, Report No: EPA-600 / 2-79-056, Ohio (1978).
57. Enviromental Protection Agency (EPA), *Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA Wastes*, Ohio (1989).
58. Enviromental Protection Agency (EPA), *'Interference Mechanism in Waste Stabilization/Solidification Process'* EPA-600/2-89/067, U.S. EPA,Ohio (1990).

59. Environmental Protection Agency (EPA), *Silicate Technology Corporation's Stabilization/Solidification Technology for Organic and Inorganic Contaminants in Soil*. Applications Analysis Report. EPA-540/AR-92-10, Ohio (1992).
60. AKHTER, H., BUTLER, L.G., BRANZ, S., CARTLEDGE, F.K. ve TITTLEBAUM, M.E., *Immobilization of As, Cd, Cr and Pb-Containing Soils by Using Cement or Pozzolanic Fixing Agents*, Journal of Hazardous Materials (1990).

EKLER

Çizelge A.1. Literatürde kirli zeminler için verilen maksimum metal miktarları *

Metaller	İngiltere (mg/kg hava kurusu zemin) Kullanım Yeri	İngiltere (mg/kg hava kurusu zemin) Başlangıç Sınır Değeri
Arsenik(Ar)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	10 40
Bakır (Cu)	Herhangi Bir Bitki Yetişen Yerde	130
Bor (B)	Herhangi Bir Bitki Yetişen Yerde	3
Civa (Hg)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	1 20
Çinko (Zn)	Herhangi Bir Bitki Yetişen Yerde	300
Kadmiyum (Cd)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	3 15
Krom (Cr) (IV)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	600 600
Krom (Cr) (Toplam)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	600 1000
Kurşun (Pb)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	500 2000
Nikel (Ni)	Herhangi Bir Bitki Yetişen Yerde	70
Selenyum (Se)	Ev Bahçeleri, Parklar, Oyun Alanları, Açık Yerler	3 6

* Kaynak : Water Environment Federation (WEF) (1993)

Çizelge A.2. Literatürde leachate suyu içindeki organikler ve tuzların maksimum limitleri

Organikler ve Tuzlar	İçme Suyu Standardı ¹ (mg/l)	Deşarj Standardı ² (mg/l)	Su İçinde Kabul Edilebilir Değer ³ (mg/l)	Su İçinde Kabul Edilebilir Değer ⁴ (mg/l)
Benzol	--	--	0.005	--
Fenol	0.02	1	--	0.5
Naftalin	--	--	0.62	--
Sülfat	--	10	--	1
Klorür	250	--	--	600
pH	--	6-9	--	--
Sodyum	--	--	--	--
Elektriksel İletkenlik (mohs/cm)	23	--	--	--

¹Environment Canada (1979); ² Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (1988); ³Stephanatos, et al. (1988); ⁴Lagrega, et al.(1990)

Çizelge A.3. Literatürde leachate suyu için müsaade edilen metallerin maksimum limitleri

Metaller	TCLP ^a (mg/l)	ASTM ^a (mg/l)	EP Toxicity ^b (mg/l)	Literatürde Bulunan Değerler		
				Sızıntı Suyu ^c (mg/l)	Sızıntı Suyu ^a (mg/l)	Sızıntı Suyu ^d (mg/l)
Alüminyum (Al)	--	--	--	--	3.900	--
Arsenik (As)	0.70	0.04	5.0	--	850	500
Bakır (Cu)	--	--	--	0.005-9.9	--	--
Baryum (Ba)	0.44	0.34	100	--	340	--
Civa (Hg)	<0.002	<0.002	0.2	--	<0.3	--
Çinko (Zn)	--	--	--	60%	--	--
Demir (Fe)	--	--	--	4-2820	204.000	--
Gümüş (Ag)	<0.01	<0.01	5.0	--	10	--
Kadmiyum (Cd)	<0.02	<0.02	1.0	0.3-17	20	100
Kalsiyum (Ca)	--	247	--	--	304.000	--
Krom (Cr)	<0.01	<0.01	5.0	0.2-18	370	500
Kurşun (Pb)	<0.035	<0.035	5.0	0.001-2	330	500
Nikel (Ni)	--	--	--	0.2-79	--	134
Magnezyum (Mg)	--	<1.0	--	--	510	--
Potasyum (K)	--	--	--	--	1.100	--
Selenyum (Se)	<0.01	<0.01	1.0	--	14	--
Sodyum (Na)	--	--	--	--	1.100	--

^aFoxworthy, et al. (1996); ^bTaha (1993) ve Morgan (1984); ^cRay, et al. (1986); ^dSchurger (1985)

TCLP: U.S. EPA Toxicity Characteristic Leaching Procedure (SW-846, Method 1330), ASTM: American Society of Testing Materials, EP Toxicity: U.S. EPA Extraction Procedure Toxicity Test Method (SW-846, Method 1320)

Çizelge B.1. Model deneyi için hazırlanan karışımların dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı, hidrometre analizi ve kıvam limiti değerleri

Özellikler	SD	S5K	S5Ç	S5Z	S10K	S10Ç	S10Z
Dane Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	2.43	2.46	2.44	2.43	2.50	2.48	2.45
Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	1.24	1.62	1.85	1.83	1.86	1.90	1.88
Hidrometre Analizi							
Kil (%)	35	32	34.7	36	24	29	40
Silt (%)	65	68	65.3	64	76	71	60
Kıvam Limitleri							
Likit Limit (%)	63	61	62	64	59	60	54
Plastik Limit (%)	42	48	47	49	56	52	47
Plastisite İndeksi (%)	21	13	15	15	3	8	7

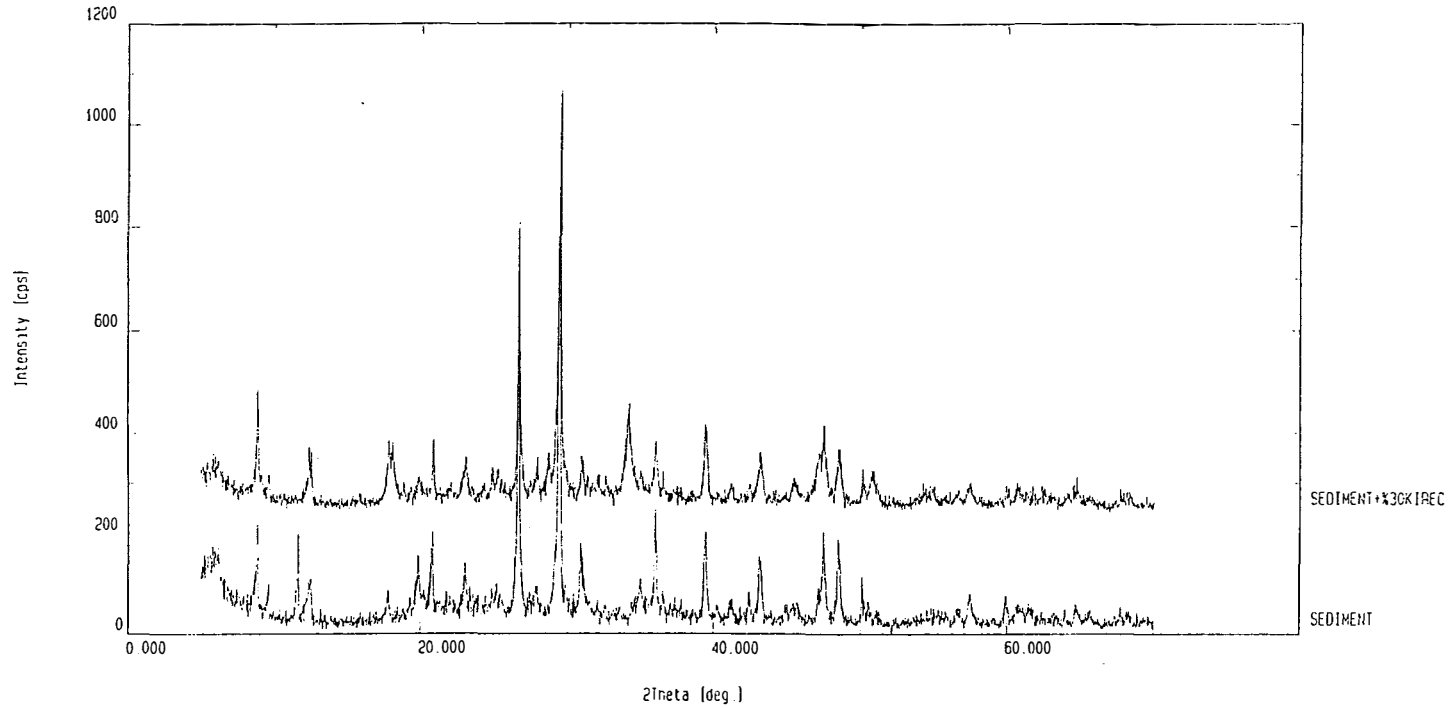
Çizelge B.2. Model deneyi için hazırlanan numunelerin pH, elektriksel iletkenlik, kation değişim kapasitesi ve organik madde miktarı değerleri

Karışımlar	pH	Elektriksel İletkenlik (miliSimens/cm)	Organik Madde Miktarı (%)
SD	7.60	1.89	6.80
S5K	8.85	1.53	5.50
S5Ç	8.29	1.60	5.90
S5Z	7.65	1.63	6.40
S10K	10.06	1.41	4.05
S10Ç	8.81	1.46	4.90
S10Z	7.69	1.52	5.92
S20K	10.95	1.16	3.57
S20Ç	9.47	1.19	3.88
S20Z	7.85	1.30	5.50
S30K	11.24	0.94	3.00
S30Ç	10.15	0.92	3.24
S30Z	8.12	1.08	5.28

Çizelge B.3. Model deneyi için hazırlanan karışımlarda ölçülen toplam metal miktarları (mg/kg)

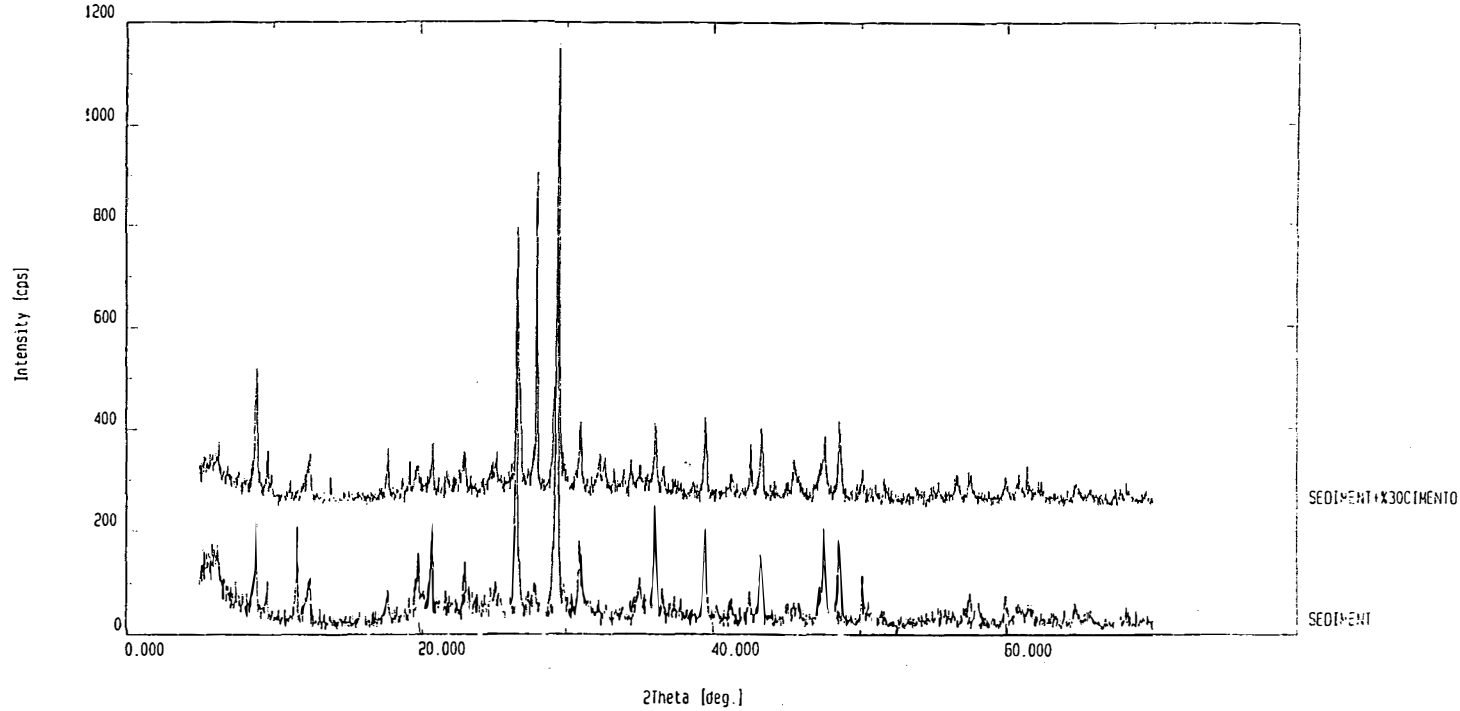
Karışımlar	Kurşun (Pb)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)	Bakır (Cu)	Kadmiyum (Cd)	Çinko (Zn)
SD	314	101	102	66	0.20	2448
S5K	181	51	59	32	0.21	1306
S5Ç	238	75	89	41	0.17	1593
S5Z	103	31	20	26	0.15	857
S10K	56	17	21	18	0.21	686
S10Ç	86	28	28	25	0.15	786
S10Z	23	4	6	15	0.16	284
S20K	24	8	17	13	0.21	326
S20Ç	47	17	21	17	0.18	597
S20Z	10	3	3	7	0.12	160
S30K	10	4	12	10	0.20	195
S30Z	3	1	2	5	0.11	75

Sample : SEDIMENT X-ray : Cu K-ALPHA1 / 40 kV / 30 mA Counter : Scintillation counter
File : SENIZ.2298 Gonio : RINT2000 Wide angle goniometer
Comment : INSAAT Attachment : Standard Sample Holder
Date : 27-Jun-03 04:12 Filter : Not installed Scan mode : CONTINUOUS
Operator : Rigaku I.Monochro : Scan speed : 2 deg./min
C.Monochro : Automatic monochromator Scan step : 0.02 deg.
Divergence slit: "1/2deg." Scan axis : 2 Theta / Theta
Scattering slit: "1/2deg." Scan range : 5 -> 70 deg.
Receiving slit: "0.15mm" Theta offset: 0 deg.
Sample rotation: 0 deg.



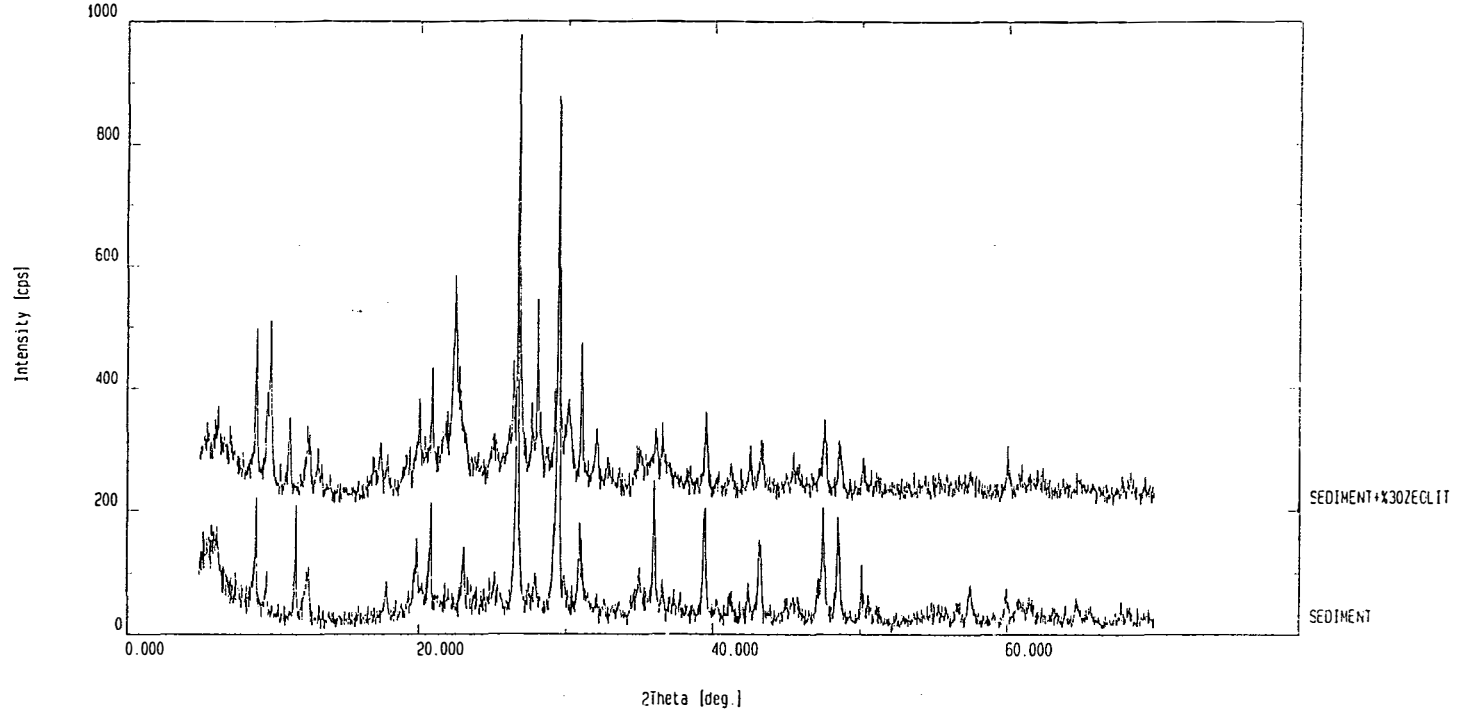
Şekil B.1. Sediment ile %30 Kireç karışımının X-Ray Elemental Analizi Sonucu

Sample : SEDIMENT X-ray : Cu K-ALPHA1 / 40 kV / 30 mA Counter : Scintillation counter
File : SENIZ.2298 Gonio : RINT2000 Wide angle goniometer
Comment : INSAAT Attachment : Standard Sample Holder
Date : 27-Jun-03 04:12 Filter : Not installed Scan mode : CONTINUOUS
Operator : Rigaku I.Monochro : Scan speed : 2 deg /min
C.Monochro : Automatic monochromator Scan step : 0.02 deg
Divergence slit: "1/2deg." Scan axis : 2 Theta / Theta
Scattering slit: "1/2deg." Scan range : 5 -> 70 deg.
Receiving slit: "0.15mm" Theta offset: 0 deg.
Sample rotation: 0 deg;

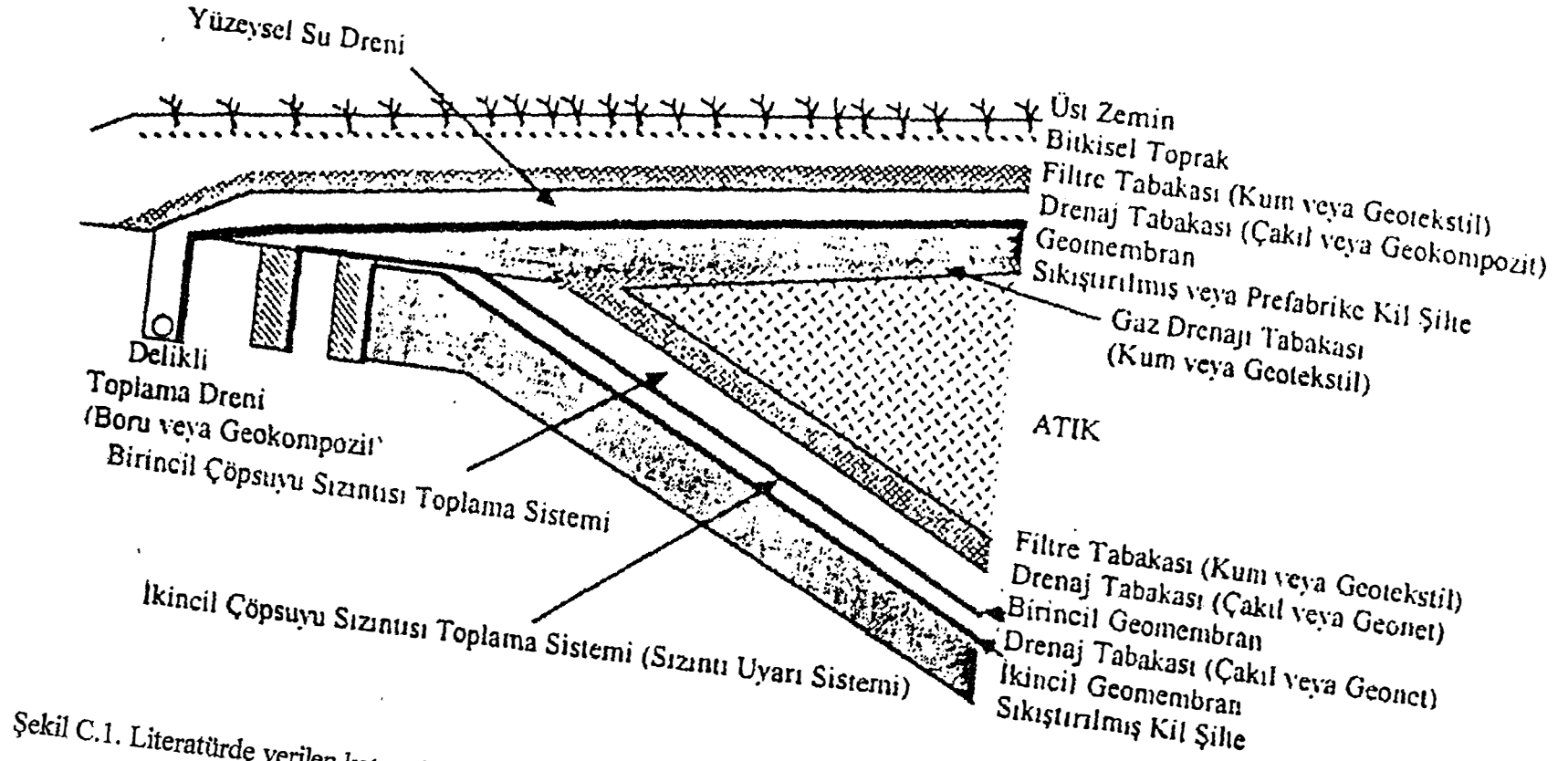


Şekil B.2 Sediment ile %30 Çimento karışımının X-Ray Elemental Analizi Sonucu

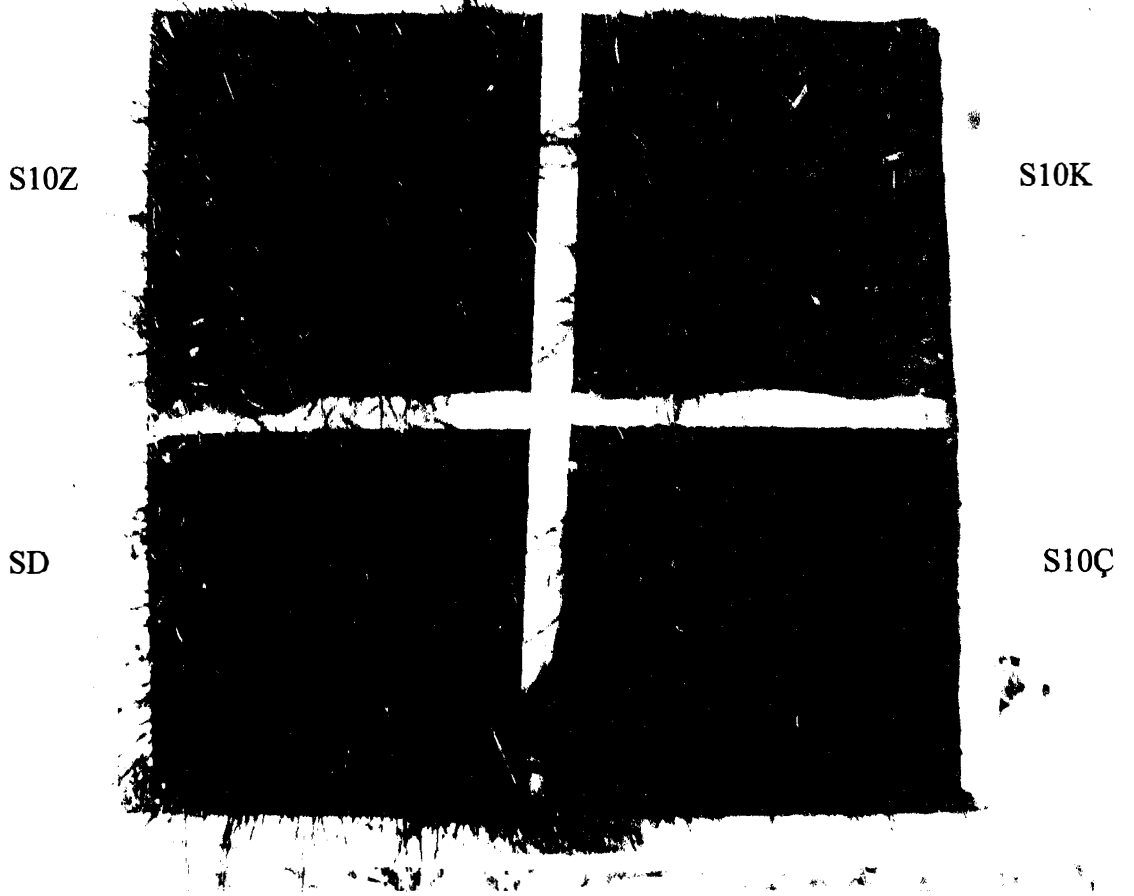
Sample : SEDIMENT X-ray : Cu K-ALPHA1 / 40 kV / 30 mA Counter : Scintillation counter
File : SENIZ.2298 Gonio : RINT2000 Wide angle goniometer
Comment : IUSAAT Attachment : Standard Sample Holder
Date : 27-Jun-03 04:12 Filter : Not installed Scan mode : CONTINUOUS
Operator : Rigaku I.Monochro : Scan speed : 2 deg./min.
C.Monochro : Automatic monochromator Scan step : 0.02 deg.
Divergence slit: "1/2deg." Scan axis : 2 Theta / Theta
Scattering slit: "1/2deg." Scan range : 5 -> 70 deg.
Receiving slit: "0.15mm" Theta offset: 0 deg.
Sample rotation: 0 deg.



Şekil B.3. Sediment ile %30 Zeolit karışımının X-Ray Elemental Analizi Sonucu



Şekil C.1. Literatürde verilen katı atık depolama alanı örneği



Şekil C.2. Sediment atık çamuru ve stabilize edilen sediment atık çamurunun kullanılabilirliği için yapılan çalışmadan bir görünüş