

**BOR ATIKLARININ KATI ATIK DÜZENLİ  
DEPOLAMA TESİSLERİNDE GEOMEMBRAN  
TABAKA OLARAK KULLANIMI**

Derya ULUTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2015

**Bu tez çalışması TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) Proje No: 113Y122 ve AÜBAP (Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı) Proje No: 1301F037 tarafından desteklenmiştir.**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Derya Ulutaş'ın “Bor Atıklarının Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinde Geomembran Tabaka Olarak Kullanımı” başlıklı Kimya Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 20.10.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

|                       | <u>Adı Soyadı</u>                 | <u>İmza</u> |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------|
| Üye (Tez Danışmanı) : | <b>Prof. Dr. MÜFİDE BANAR</b>     | .....       |
| Üye :                 | <b>Prof. Dr. Yücel GÜNEY</b>      | .....       |
| Üye :                 | <b>Yard. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ</b> | .....       |

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/10/2015 tarih ve 20/32 sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **BOR ATIKLARININ KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİNDE GEOMEMBRAN TABAKA OLARAK KULLANIMI**

**Derya ULUTAŞ**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Müfide BANAR**

**2015, 99 Sayfa**

Bu tezde, Eskişehir Kırka Bor İşletmesi'nde her yıl oluşan 400.000 tonluk atık kilin değerlendirilebilmesi amacıyla bitüm, bentonit ve atık lastik ile taşıyıcı malzemeler de kullanılarak, düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilen bitümlü geomembran üretilmiştir. Geomembran numunelerinde kalınlık, birim alan kütlesi, çekme dayanımı, uzama ve hidrolik iletkenlik testleri yapılmış; en iyi sonuçlar, **PK-BTM30CW70**, (*Polyester Keçe taşıyıcılı, % 30 Bitüm, % 70 Atık Kil; Çekme Dayanımı: 3,08 MPa, Uzama: % 68, Hidrolik İletkenlik:  $3 \times 10^{-6} m^3/m^2/gün$* ) karışımında elde edilmiştir. Üretilen bu geomembran malzemenin sızıntı suyu ile etkileşimini görmek için de, bir kentsel katı atık depolama sahası sızıntı suyu ve tehlikeli atık depolama sahası sızıntı suyu ile deneysel çalışmalar yapılmış ve geomembranın özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Yapılan SEM analizinde, bitümden ayrılan bir miktar kilin oluşturduğu boşluklardan dolayı meydana gelen çatlaklar haricinde yapısal bir değişiklik gözlemlenmemiş; bu değişimden üretilen geomembranın hidrolik iletkenliğini etkilenmemiş ve deney süresince hiçbir sızıntı görülmemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bor türevleri tesisi, atık kil, geomembran, geçirimsiz tabaka, sızıntı suyu

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### UTILIZATION OF BORON WASTE CLAY AS GEOMEMBRANE IN LANDFILLS

Anadolu University  
Graduate School of Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Müfide BANAR

2015, 99 pages

In this thesis, with the intent of utilizing waste clay generated annually 400.000 tons at Eskişehir Kırka Boron Works, bitumen, bentonite, waste tire and carrier materials were supplemented to the waste clay in order to produce a geomembrane which is appropriate to use in landfills as impermeable layer. Thickness, mass per unit area, tensile strength, elongation and hydraulic conductivity tests were performed on geomembrane samples and the optimum sample was determined as **PK-BTM30CW70** (*Carrier: Non-woven Polyester, 30 % Bitumen, 70 % Waste Clay; Tensile Strength: 3,08 MPa, Elongation at Yield: 68 %, Hydraulic Conductivity:  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$* ). In order to investigate the interaction between the stated geomembrane and leachate, experimental studies were performed with samples collected from a municipal solid waste and a hazardous waste landfill leachate; then alteration in the geomembrane structure were specified. Except some minor fractures comprised of waste clay releasing from the bitumen and leaving minor gaps in geomembrane, SEM analysis showed no structural differences, and this alteration did not affect the hydraulic conductivity of geomembrane so that leaching was not observed during the experiment.

**Keywords:** Boron derivatives plant, waste clay, geomembrane, impermeable liner, leachate

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve yardımlarıyla her zaman desteğini hissettiğim, tezime ve bana çok emek veren danışman hocam Prof. Dr. Müfide BANAR'a, bana her konuda yardımcı olan ve beni yönlendiren değerli hocalarım Doç. Dr. Aysun ÖZKAN ve Yard. Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA'ya,

Tez çalışmamı destekleyen TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Proje No: 113Y122) ve AÜBAP'a (Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı, Proje No: 1301F037),

Tezde kullanılan malzemelerin tedarikini sağlayan Eti Maden Kırka Bor İşletmesi, KÜKAB (Kütahya Katı Atık Birliği), İZAYDAŞ (İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.), TÜPRAŞ (Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.) ve Benli Geri Dönüşüm Ltd. Şti.'ne,

Çalışmamın deneysel kısımlarında benden yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Yücel GÜNEY, Doç. Dr. Tuğrul SEYHAN, Yard. Doç. Dr. Erhan AYAS, Araş. Gör. Akif ARI ve Nazım ERDURAN'a,

Desteklerini her zaman hissettiren sevgili arkadaşlarım Alper Mergen, Pelin ERTÜRK, İlhan KAHRAMAN, Eren BAYRAKCI, İbrahim HACIOĞLU, Enis HASANOĞLU ve Gizem Suzan DÖNER'e,

Hayatlarını beni iyi yetiştirmeye adanmış, karşılıksız ve koşulsuzca her zaman yanımda olan ve bu yolda hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan canım ailem; annem Meryem ARIKÖK, babam Tunca ARIKÖK ve ablam Duygu DEĞİRMENCİ'ye,

Bana tarifi olmayan bir mutluluk ve huzur tattıran, yaşamıma anlam katan, moral kaynağım, biricik yeğenim İnci DEĞİRMENCİ'ye,

Zorlandığım her anda yanımda olup beni motive eden, hayattan keyif almamı sağlayan, sonsuz sevgisi, desteği ve anlayışıyla, tezimin tamamlanmasında büyük payı olan sevgili eşim Umut ULUTAŞ'a teşekkür ederim.

Derya ULUTAŞ

## İÇİNDEKİLER

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÖZET</b>  | <b>i</b>    |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>ii</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR</b>  | <b>iii</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>   | <b>iv</b>   |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>   | <b>vi</b>   |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>   | <b>viii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>1. GİRİŞ</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2. KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ VE GEÇİRİMSİZ TABAKA SİSTEMİ</b>    | <b>4</b>    |
| 2.1. Sızıntı Suyu Yönetimi .....   | 9           |
| 2.2. Geçirimsiz Tabaka.....  | 14          |
| 2.2.1. Geomembran .....  | 17          |
| 2.2.1.1. Polimerik geomembranlar .....   | 19          |
| 2.2.1.2. Bitümlü geomembranlar .....   | 20          |
| 2.3. Ulusal Mevzuat .....  | 22          |
| <b>3. BOR BİLEŞİKLERİNİN ÜRETİMİ VE ATIK OLUŞUMU</b>                           | <b>26</b>   |
| 3.1. Bor Bileşiklerinin Üretimi ve Üretimden Kaynaklanan Atıklar .....         | 30          |
| 3.1.1. Kırka Bor İşletmesi ve Atıkları .....                                   | 32          |
| <b>4. LİTERATÜR BİLGİLERİ</b>  | <b>35</b>   |
| 4.1. Bor Atık Kili ile İlgili Çalışmalar .....                                 | 35          |
| 4.2. Bitüm, Atık Lastik ve Geomembran ile İlgili Çalışmalar .....              | 39          |
| 4.3. DDT’lerde Kullanılan Geomembranlar ile İlgili Çalışmalar .....            | 42          |
| <b>5. MATERYAL VE METOD</b>  | <b>46</b>   |
| 5.1. Atık Kilin Fiziksel, Kimyasal ve Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi..... | 48          |
| 5.1.1. Atık kilin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....                    | 48          |
| 5.1.2. Atık kilin kimyasal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi.....         | 51          |
| 5.1.3. Bulgular ve değerlendirme .....   | 56          |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.2. Atık Kilin DDT'lerde Geomembran Üretiminde Kullanımı ile İlgili Deneysel Çalışmalar .....          | 63        |
| 5.2.1. Geomembran üretiminde kullanılan malzemeler .....  | 63        |
| 5.2.2. En uygun geomembran karışımının üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi .....                     | 66        |
| 5.2.3. Bulgular ve değerlendirme .....  | 74        |
| 5.3. Sızıntı Suyu Çalışmaları .....   | 78        |
| 5.3.1. Sızıntı sularının başlangıç karakterizasyonlarının belirlenmesi .....                            | 80        |
| 5.3.2. En uygun geomembran karışımının sızıntı suyu geçişi sonrası yapısal durumunun belirlenmesi ..... | 81        |
| 5.3.3. Bulgular ve değerlendirme .....  | 82        |
| 5.4. Maliyet Hesaplaması .....  | 86        |
| <b>6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME</b>  | <b>88</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>  | <b>90</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Eskişehir Kırka Bor İşletmeleri atıkları .....                                | 2  |
| 2.1. Atık yönetim hiyerarşisi .....  | 5  |
| 2.2. Vahşi depolama sahaları .....   | 6  |
| 2.3. 1994-2012 TÜİK verilerine göre toplanan ve bertaraf edilen atık miktarı ..... | 7  |
| 2.4. Katı atık depolama sahasının gelişimi ve tamamlanması .....                   | 8  |
| 2.5. Sızıntı suyu oluşumu .....  | 10 |
| 2.6. DDT'lerde su dengesi .....  | 11 |
| 2.7. Geosentetiklerin sınıflandırılması .....                                      | 15 |
| 2.8. Geosentetik kil örtü (GCL) çeşitleri.....                                     | 16 |
| 2.9. Bitümlü geomembranın yapısı .....   | 21 |
| 3.1. Bor tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı .....                       | 29 |
| 3.2. Bor kimyasalları ve eşdeğeri ürün üretimi .....                               | 31 |
| 3.3. Kırka Bor İşletmesi atık göleti .....   | 34 |
| 5.1. İş akış şeması .....  | 47 |
| 5.2. ICP-MS/MS cihazı .....  | 51 |
| 5.3. XRD cihazı.....   | 52 |
| 5.4 XRF cihazı .....   | 53 |
| 5.5. Taramalı elektron mikroskobu .....  | 54 |
| 5.6. FT-IR cihazı .....  | 54 |
| 5.7. BET cihazı.....   | 55 |
| 5.8. Elementel analiz cihazı .....   | 56 |
| 5.9. Granülometri eğrisi .....   | 58 |
| 5.10. Atık kilin XRD spektrumu .....   | 60 |
| 5.11. Atık kilin (a)1000x (b) 25000x yakınlaştırmalı SEM görüntüleri.....          | 61 |
| 5.12. Atık kilin FT-IR spektrumu .....   | 62 |
| 5.13. UTEST laboratuvar mikseri .....  | 67 |
| 5.14. Çift vidalı ekstrüder.....   | 68 |
| 5.15. Ekstrüderden çıkan bitümlü karışım numunesi.....                             | 69 |
| 5.16(a). Ekstrüderden çıkan bitümlü karışıma taşıyıcının yerleştirilmesi .....     | 70 |
| 5.16(b). Karışımın katlanarak geomembran oluşturulması .....                       | 70 |
| 5.16(c). Basınç uygulanarak taşıyıcının bitüm ile kaplanması .....                 | 70 |



|  |    |
|--|----|
| <b>5.16(d).</b> Geomembran numunesi .....  | 70 |
| <b>5.17.</b> Birim alan kütlesi ölçümünde kullanılan numuneler .....   | 71 |
| <b>5.18.</b> Instron 5944 çekme deneyi cihazı.....   | 72 |
| <b>5.19.</b> Bitümlü karışımların çekme/uzama deney numuneleri.....  | 73 |
| <b>5.20.</b> Bitümlü geomembranların çekme/uzama deney numuneleri.....   | 73 |
| <b>5.21.</b> Hidrolik iletkenlik deney düzeneği .....  | 73 |
| <b>5.22.</b> Sızıntı suyu deney düzeneği ve geomembranın yerleştirildiği mold .....  | 79 |
| <b>5.23.</b> Geomembranın molddan çıkartılması .....   | 82 |
| <b>5.24.</b> Kuru halde PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü <b>(a)</b> 300X <b>(b)</b> 500X .....                                | 83 |
| <b>5.25.</b> Saf suya maruz bırakılan PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü <b>(a)</b> 300X<br><b>(b)</b> 1000X.....               | 84 |
| <b>5.26.</b> KÜKAB sızıntı suyuna maruz bırakılan PK-BTM30CW70'in SEM<br>görüntüsü <b>(a)</b> 300X <b>(b)</b> 1000X .....  | 85 |
| <b>5.27.</b> İZAYDAŞ sızıntı suyuna maruz bırakılan PK-BTM30CW70'in SEM<br>görüntüsü <b>(a)</b> 500X <b>(b)</b> 1000X..... | 85 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Yeni ve olgun depolama alanları için sızıntı suyu bileşimi .....                          | 12 |
| 2.2. Katı atık bertaraf tesisleri için deşarj standartları .....                               | 14 |
| 2.3. Bitümlü geomembranların genel özellikleri.....  | 22 |
| 2.4. Düzenli depolama tesislerinde kullanılan sızdırmaz malzemeler ile ilgili standartlar..... | 25 |
| 3.1. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri .....                                   | 27 |
| 3.2. 2014 yılı dünya bor rezervleri .....  | 27 |
| 3.3. 2014 yılı dünya bor üretim kapasiteleri .....   | 27 |
| 3.4. 2014 yılı Eti Maden İşletmeleri rezerv miktarları.....                                    | 28 |
| 3.5. Ticari bor mineral konsantralleri ve bileşiklerinin üretim yöntemleri .....               | 31 |
| 5.1. Atık kilin başlangıç analiz sonuçları .....   | 56 |
| 5.2. Elek analizi sonuçları .....  | 57 |
| 5.3. Hidrometre deneyi sonuçları .....   | 57 |
| 5.4. Atık kilin ICP-MS analizi sonuçları.....  | 59 |
| 5.5. XRF analizi sonuçları.....  | 60 |
| 5.6. Atık kilin elementel analiz sonuçları.....  | 63 |
| 5.7. Bor türevleri atığının özellikleri.....   | 64 |
| 5.8. Tezde kullanılan bitümün özellikleri .....  | 64 |
| 5.9. Polyester keçe ve cam elyaf tülünün özellikleri.....                                      | 66 |
| 5.10. Hazırlanan bitümlü karışımlar ve oranları .....  | 67 |
| 5.11. Ekstrüzyon sıcaklık profilleri.....  | 69 |
| 5.12. Kalınlık ve birim alan kütlesi analizleri sonuçları .....                                | 75 |
| 5.13. Çekme dayanımı ve uzama analizleri sonuçları.....  | 76 |
| 5.14. Hidrolik iletkenlik analizleri sonuçları .....   | 78 |
| 5.15. Sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonu .....                              | 83 |
| 5.16. Ticari geomembranlara ait fiyat bilgisi .....  | 87 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|         |  |
|---------|--|
| ADDDY   | : Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik  |
| AKM     | : Askıda Katı Madde  |
| ASTM    | : Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (American Society for Testing and Materials)                             |
| BET     | : Brunauer Emmett Teller   |
| BGM     | : Bitümlü Geomembran (Bitümunios Geomembrane)  |
| BOİ     | : Biyolojik Oksijen İhtiyacı   |
| C GCL   | : Geosentetik kil tabakası   |
| CEC     | : Katyon Değişim Kapasitesi (Cation Exchange Capacity)   |
| CSPE    | : Klorosülfone Polietilen (Chlorosulfonated Polyethylene)  |
| DDT     | : Düzenli Depolama Tesisi  |
| DPH GCL | : Ön ıslatma işleminden sonra sıkıştırılmış geosentetik kil tabakası   |
| EPA     | : Çevre Koruma Kuruluşu (Environmental Protection Agency)  |
| EPDM    | : Etilen Propilen Dien Monomer (Ethylene Propylene Diene Monomer)  |
| FML     | : Esnek Membran Tabaka (Flexible Membrane Liner)   |
| FT-IR   | : Fourier Transform İnfrared Spektrometresi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)                          |
| GBR     | : Geosentetik Bariyer (Geosynthetic Barrier)   |
| GBR-B   | : Bitümlü Geosentetik Bariyer (Geosynthetic Barrier-Bituminous)  |
| GCL     | : Geosentetik Kil Örtü (Geosynthetic Clay Liner)   |
| HDPE    | : Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylene)   |
| ICP-MS  | : İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma – Kütle Spektrometresi (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer) |
| ISO     | : Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)                         |
| İZAYDAŞ | : İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.   |
| KAKY    | : Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği  |
| KÜKAB   | : Kütahya Katı Atık Birliği  |
| KC      | : Kaolin Kili  |
| KOİ     | : Kimyasal Oksijen İhtiyacı (Chemical Oxygen Demand)   |

|        |  |
|--------|--|
| LLDPE  | : Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen (Linear Low Density Polyethylene) |
| PE     | : Polietilen (Polyethylene)  |
| PP     | : Polipropilen (Polypropylene)   |
| PVC    | : Polivinil Klorür (Polyvinyl Chloride)                                |
| SBS    | : Stiren-bütadien-stiren (Styrene-butadiene-styrene)                   |
| SEM    | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)          |
| SKKY   | : Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği                                    |
| TOK    | : Toplam Organik Karbon  |
| TÜİK   | : Türkiye İstatistik Kurumu  |
| TÜPRAŞ | : Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.                                     |
| XRD    | : X-ışını Kırınım (X-ray Diffraction)                                  |
| XRF    | : X-ışını Floresans (X-ray Fluorescence)                               |

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojinin hızla gelişmesi, üretim ve tüketimin, dolayısıyla katı atık miktarının artmasına sebep olmaktadır. Kaynakların azalmaya başlamasıyla birlikte sürekli artan atık miktarının çevreye ve insan sağlığına zarar vermemesi için atık yönetimi zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Katı atık yönetimi, atıkların toplanması, işlenmesi, geri dönüştürülmesi veya bertaraf edilmesinin; düzenli depolama sahalarının, aktarma istasyonlarının, atık yakma tesislerinin ve benzer işletmelerin denetlenmesi ile kaynakların korunması amacıyla kullanılan metodların tümünün genel adıdır.

Katı atıkların bertaraf yöntemleri arasında kullanımı en yaygın olan yöntemlerden birisi olan düzenli depolama yöntemi, atıkların, geçirimsizliği sağlanmış bir alana döküldükten sonra sıkıştırılıp üzerinin örtülerek kontrollü şartlar altında doğal bir biyolojik reaktör haline getirilmesi sürecidir.

Katı atıkların depolanmasındaki en önemli sorunlardan birisi sızıntı suyu yönetimidir. Oluşan sızıntı suyunun yeraltı sularına geçişini engellemek için düzenli depolama tesisinde, belirli geçirimsizlik şartlarının sağlanması gerekir. Bu amaçla önceleri yalnızca kil kullanılırken, gelişen polimer teknolojisi ile birlikte, sentetik geçirimsiz tabakalar kullanılmaya başlanmış; günümüzde ise bu malzemelerin kullanımı standart bir uygulama haline gelmiştir (Aras ve ark., 2006). Ülkemizde, 26 Mart 2010'da yayımlanan "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)" Madde 16'ya göre, "*düzenli depolama tesisinin tabanı ve yan yüzeylerinde, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde bir geçirimsizlik tabakası oluşturulmalıdır. Bunun için kil veya eşdeğeri malzemedan oluşturulmuş geçirimsizlik tabakası serilmeli, geçirimsizlik tabakasının fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özellikleri, depolama tesisinin toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel riskleri önleyecek nitelikte olmalıdır.*" Jeolojik geçirimsizlik tabakasının, belirlenen geçirgenlik koşullarını doğal olarak sağlayamaması halinde; bu tabaka yapay olarak oluşturulur ve geomembran kullanılarak güçlendirilir.

Geomembran, geoteknik ve mühendislik uygulamalarında bir yapı içerisine sıvı geçişini azaltmak veya önlemek amacıyla kullanılan düşük geçirimli geosentetik bariyerdir. Geomembran, kimyasal maddelere karşı yüksek direnç gösterir, yüksek çekme mukavemetine sahiptir, geçirgenliği düşük, delinme ve çatlamalara karşı dayanıklıdır ve sahip olduğu bu özellikler nedeniyle olası sızmalara karşı üstün koruma oluşturan bir malzemedir.

Ülkemizdeki mevcut belediyelerden (30 adet Büyükşehir Belediyesi, 51 adet İl Belediyesi, 519 adet Büyükşehir İlçe Belediyesi, 400 adet İlçe Belediyesi ve 397 adet Belde Belediyesi olmak üzere toplam 1397 belediye (Türkiye Belediyeler Birliği, 2014)) DDT bulunan belediye sayısı 76 olup, bu sayı önümüzdeki yıllarda daha da artacaktır. Bu da, daha fazla geomembran ihtiyacının doğmasına neden olacaktır. Çalışmanın çıkış noktası da bu ihtiyacın giderilmesi amacıyla, bir atık türünün değerlendirilerek, bir başka atık prosesinde kullanılabilen bir malzemenin üretilmesi olmuştur. Bu amaçla, Eskişehir Kırka Bor İşletmesi'nde bulunan ocaklardan, konsantratör ve bor türevleri tesislerinde ortaya çıkan atıklar seçilmiştir. Ülkemizde her yıl bor mineralleri üretimi sırasında ortaya çıkan 900.000 ton atık kilin 400.000 tonluk kısmı bu tesiste oluşmaktadır (Şekil 1.1). Türkiye'nin en büyük bor işletmelerinden olan, Eskişehir Kırka Bor İşletmesi'nde 6 adet atık barajı mevcut olup, işletmenin kapasitesinden dolayı her 4 yılda bir yeni bir atık barajına ihtiyaç duyulmaktadır. İşletme ömrünün en az 250 yıl olduğu dikkate alındığında, yeni atık barajları oluşturmanın çözüm olmadığı, atık kilin değerlendirilmesinin zorunlu olduğu açıkça görülmektedir.



**Şekil 1.1.** Eskişehir Kırka Bor İşletmeleri atıkları

Tezde, bor tesislerinde oluşan atıkların değerlendirilebilmesi için bor işletmeleri atık kiline farklı katkı maddeleri (bitüm, bentonit ve atık lastik), farklı oranlarda ilave edilerek, elde edilen en uygun malzemenin, düzenli depolama tesislerinde bitümlü geomembran (GBR-B) olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Çeşitli oranlar kullanılarak hazırlanan geomembran numuneleri arasından 3.08 MPa ekme dayanımı, 68% uzama ve  $3 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/gün hidrolik iletkenlik değerlerine sahip olan PK-BTM30CW70 (polyester taşıyıcı, 30% bitüm, 70% kil) en uygun numune olarak seçilmiştir. Üretilen bu geomembran malzemenin sızıntı suyu ile etkileşimini görmek için de, bir kentsel katı atık depolama sahası sızıntı suyu ve tehlikeli atık depolama sahası sızıntı suyu ile deneysel çalışmalar yapılmış ve geomembranın özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir.

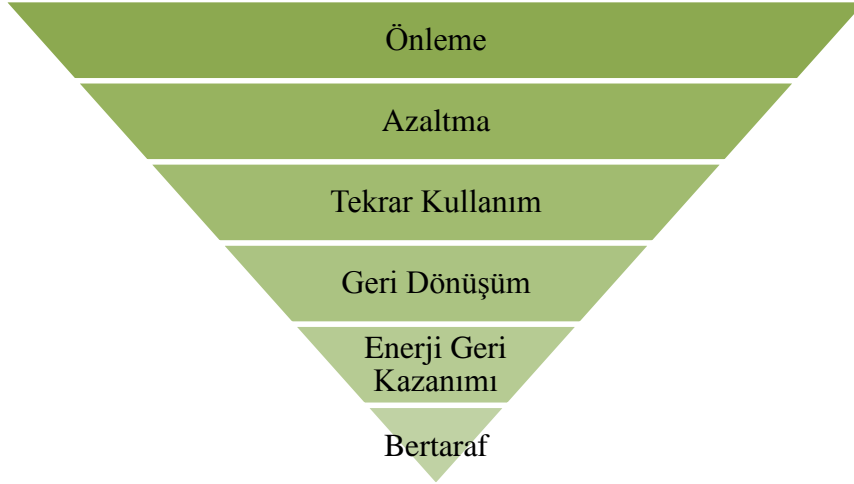
## **2. KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ VE GEÇİRİMSİZ TABAKA SİSTEMİ**

Katı atık, üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler ve arıtma çamurudur (AYY, 2015). Gelişen teknoloji, artan üretim ve nüfus nedeniyle katı atık miktarları her geçen gün artmakta ve aynı zamanda atık bileşiminde de değişimler gözlenmektedir. Katı atıkların, içeriklerine en uygun yöntem ile bertaraf edilmesi gerekir. Çevreyi doğrudan veya dolaylı bir biçimde olumsuz yönde etkileyebilecek kontrolsüz bertaraf yöntemlerinin uygulanmaması; havada, suda ve toprakta kalıcı etki gösteren kirleticilerin hayvan ve bitki nesillerini, doğal zenginlikleri ve ekolojik dengeyi bozmasının önlenmesi için atığın kaynağında azaltılması, özelliğine göre ayrılması, toplanması, geçici depolanması, ara depolanması, geri kazanılması, taşınması, bertarafı ve bertaraf işlemleri sonrası kontrolü ve benzeri işlemleri içeren bir yönetim sistemi ile yönetilmesi gereklidir.

Atık yönetimde öncelikli hedef, atığın oluşumunun önlenmesi ve oluşan atık miktarının azaltılmasının sağlanmasıdır. Oluşan atığın mümkünse yeniden kullanılması, eğer atık türü yeniden kullanıma uygun değilse geri dönüşümünün sağlanması ve daha sonra enerji geri kazanımı seçeneklerinin düşünülmesi gereklidir. Bu seçeneklerden hiç birinin uygulanamadığı atıklar veya uygulanan yöntemlerden sonra elde kalan atıklar içinse son çare düzenli depolama tesislerinde bertarafıdır. Atık yönetimde dikkat edilmesi gereken hiyerarşik sistem Şekil 2.1’de verilmiştir.

Düzenli depolama tesisleri, ADDDY (2010)’da tanımlandığı şekli ile, atıkların olduğu tesis içinde geri kazanım, ön işlem veya bertarafa gönderilmek üzere geçici depolandığı birimler, atığın geri kazanım veya ön işleme tabi tutulmak amacıyla üç yıldan daha kısa süreli ara depolandığı tesisler ile atığın bertaraf işlemine tabi tutulmak üzere bir yılı geçmeyecek şekilde ara depolandığı tesisler hariç olmak üzere atıkların yeraltı veya yer üstünde belirli teknik standartlara göre bertaraf edildiği sahalardır.





**Şekil 2.1.** Atık yönetim hiyerarşisi

Türkiye’de her yıl 9.304.200 ton atık, kontrolsüz depolama (vahşi depolama) ve diğer yöntemler kullanılarak bertaraf edilmektedir. Vahşi depolama; katı atıkların herhangi bir alt yapı ve saha çalışmalarının yapılmadığı bir alana gelişigüzel bir şekilde dökülerek bertaraf edilmesi yöntemidir (Şekil 2.2). Vahşi depolama sahalarında, yer seçimine özen gösterilmemiş, zemin etütleri yapılmamış, geçirimsizlik tabakası inşa edilmemiş ve atıklar kontrolsüz olarak dökülmüştür, dolayısıyla kayma (göçük), yangın riskleri oluşmasının yanında gerek insan sağlığı gerekse de çevre ciddi anlamda tehdit edilmektedir. Vahşi depolama alanlarında en önemli risklerden biri sızıntı sularının yeraltı ve yüzeysel su kaynaklarına karışması olduğundan, yüksek kirlilik yüküne sahip olan bu sızıntı sularının düşük miktarlarda bile olsa yeraltı sularına karışması, su rezervinin büyük bir kısmını, hatta tamamını, önemli ölçüde kirletme tehlikesini ortaya çıkartmaktadır. Yeraltı sularının hem çok düşük akım hızına sahip olması hem de yüzey sularında olduğu gibi atmosferden oksijen alabilme şansının az olması nedeniyle temizlenmesi çok zordur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Öte yandan Türkiye’de 2014 yılı sonu itibariyle 76 adet düzenli depolama tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin bulunduğu il veya ilçeler, Afyonkarahisar, Aksaray, Ankara(2), Şereflikoçhisar, Antalya, Patara, Manavgat, Kumluca, Aydın, Didim, Kuşadası, Bayburt, Bursa, Bolu, Çanakkale, Gelibolu, Denizli, Elazığ, Erzurum, Gaziantep, Hatay, Isparta, İstanbul(2), İzmir, Karaman, Kocaeli,

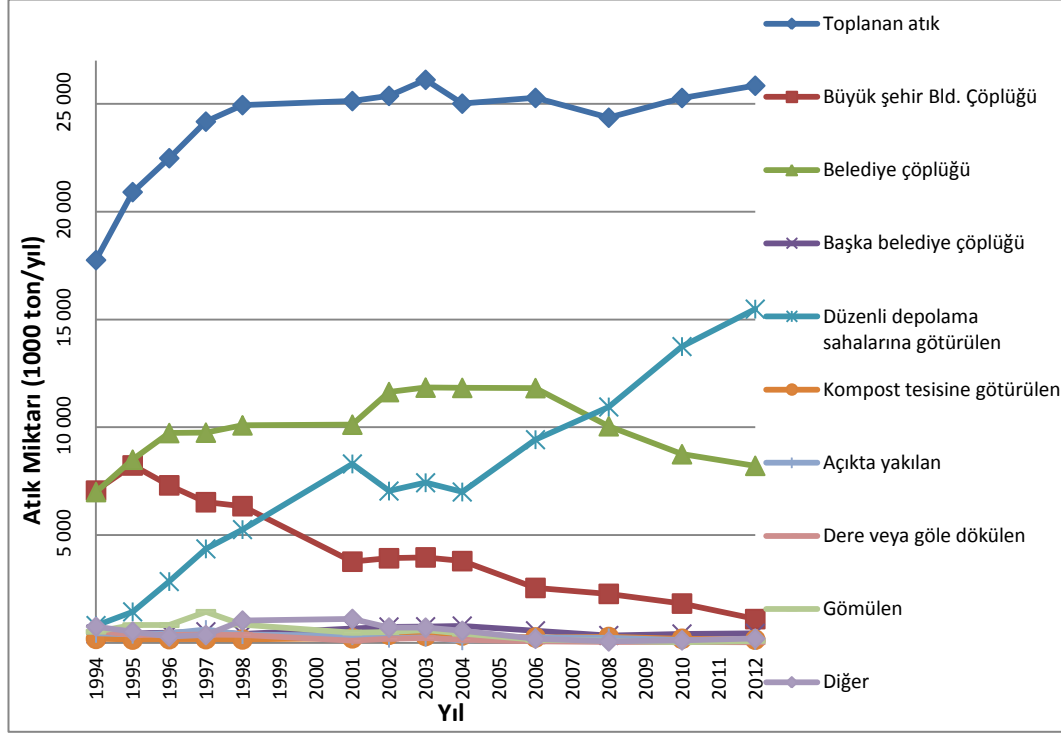
Dilovası, Cihanbeyli, Kütahya, Mersin, Silifke, Datça, Göcek, Marmaris, Ortaca, Fethiye, Sakarya, Samsun, Çarşamba, Sinop, Şanlıurfa, Tekirdağ, Trabzon-Rize, Yalova, Yozgat, Adana, Amasya, Bitlis, Bergama, Kırıkkale, Kırklareli, Kırşehir, Kilis, Akşehir, Eskişehir, Iğdır, Zonguldak, Niğde, Çankırı, Tokat (Erbaa), Siirt, Mardin, Kahramanmaraş, Nizip, Tokat (Turhal), İnegöl, Sivas, Bingöl, Kastamonu, Malatya, Nevşehir, Balıkesir, Pasinler (Erzurum) ve Giresun'dur. Türkiye'de bulunan katı atık depolama tesislerinin 16'sında toplanan metan gazından elektrik elde edilmektedir (http-1).



**Şekil 2.2.** Vahşi depolama sahaları

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de 2012 yılı itibariyle toplanan kentsel katı atık miktarı 25.845.000 ton/yıl (1,12 kg/kişi·gün) olup, ülke nüfusunun % 83'ü, belediye nüfusunun ise % 99'u atık toplama hizmetinden yararlanmaktadır. Belediyelerden toplanan atığın % 59,9'u düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmekte olup belediye nüfusunun % 64'ü atık yönetimi mevzuatına uygun bertaraf tesislerinden yararlanmakta, % 36'sının atıkları ise düzensiz (kontROLSÜZ) depolama ve diğer yöntemlerle uzaklaştırılmaktadır. 1994-2012 yılları arasında oluşturulan TÜİK verileri karşılaştırıldığında (Şekil 2.3), 18 yıl içinde bertaraf edilmiş katı atık miktarında,

nihai artış görülen tek bertaraf yönteminin, düzenli depolama yöntemi olduğu görülmektedir.



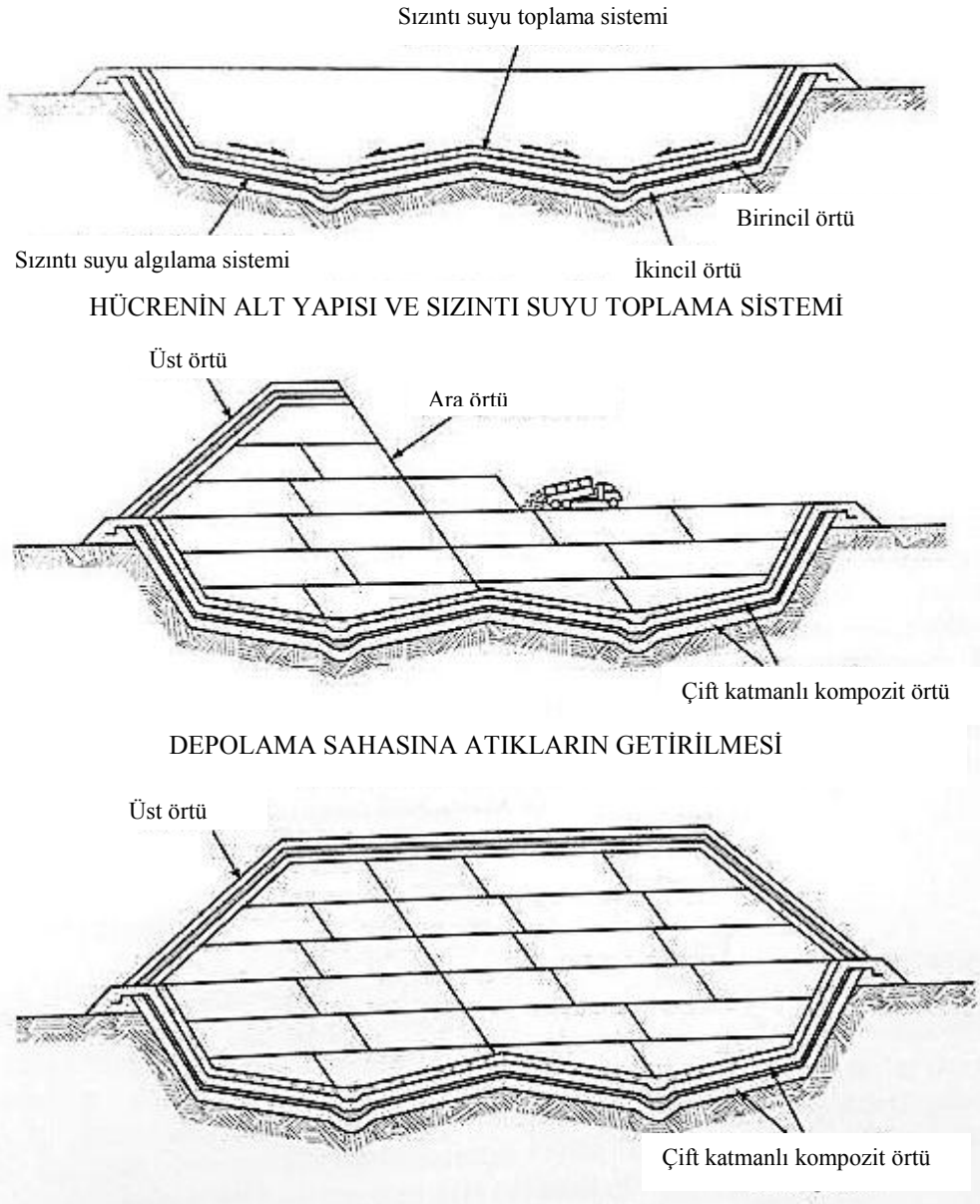
Şekil 2.3. 1994-2012 TÜİK verilerine göre toplanan ve bertaraf edilen atık miktarı

İyi tasarlanmış ve düzgün işletilen düzenli depolama sahalarında, vahşi depolamada görülen duman, koku, kötü görüntü, böcek, fare, martı ve diğer hayvanların oluşturduğu problemlerle karşılaşilmamaktadır. Bunu sağlamak için, vahşi depolama alanlarının ıslah edilmesi veya yeni bir düzenli depolama sahasının tasarımı aşamasında, profesyonel planlama ve mühendislik desteği gerekmektedir.

Düzenli depolama sahası tasarımının ilk ve en önemli adımı, yer seçimidir. İyi bir yer seçimi kararı, gelecekte insan sağlığına verilebilecek zararı minimize ederken, tasarım ve inşaat maliyetini düşürmekte, uzun ömürlü bir işletme sağlamaktadır. Uzun vadeli düzenli depolama tesisi kullanımı için incelenen faktörler, taşıma uzaklığı, konum kısıtları, uygun arsa alanı, konuma ulaşım, zemin şartları ve topografya, iklimsel şartlar, yüzey suyu hidrolojisi, jeolojik ve

hidrojeolojik şartlar, yakın çevre şartları ve tesis kapatıldıktan sonraki kullanım alanlarıdır (Qian ve ark., 2002).

Düzenli depolama tesislerinin temel unsurları taban geçirimsizliği, sızıntı suyu yönetim sistemi, üst örtü, depo gazı yönetimi ve kontrol sistemidir. Bunun yanı sıra, sahanın işletme kontrolünün sağlanması için, depolama işleminin hücreler halinde gerçekleştirilmesi, depolanan atığa yağmur suyu karışmasını önlemek amacıyla günlük örtünün serilmesi; atığın kaymasını ve içinde boşluklar kalmasını ve anaerobik ayrışmanın neden olduğu yangınları önlemek amacıyla atıkların sıkıştırılmasına dikkat edilmelidir (Şekil 2.4) (Tahtasızoğlu 2010).



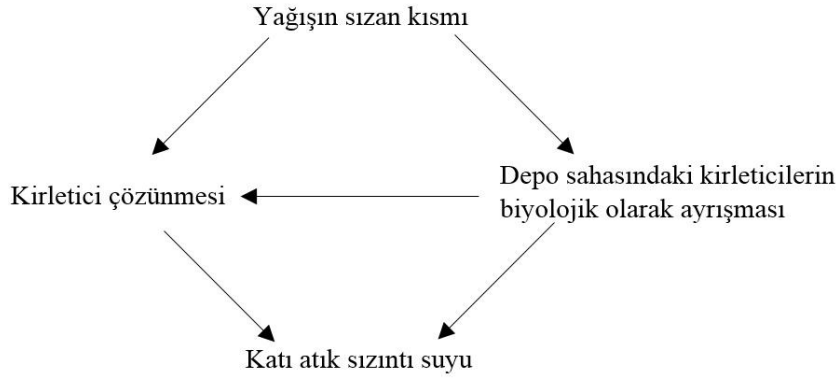
Şekil 2.4. Katı atık depolama sahasının gelişimi ve tamamlanması (Qian ve ark. 2002)

## 2.1. Sızıntı Suyu Yönetimi

Katı atık depolama sahalarında oluşan sızıntı suyunda çeşitli inorganik ve organik kimyasallar bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, sızıntı suyunun bileşiminin karmaşık olmasına neden olmakta ve atığın bozunma süreci sızıntı suyunun kalitesini etkilemektedir. Düzenli depolama alanlarında oluşan sızıntı sularının yüzey ve yeraltı sularına karışması hem çevresel hem de insan sağlığını ilgilendiren sorunlar yaratmaktadır.

Katı atıkların bozunması üç aşamadan oluşmaktadır; birinci aşamada genellikle, 1 aydan daha kısa bir sürede hızlı bir şekilde aerobik ayrışma gerçekleşir. Atıktaki mevcut oksijen kullanıldığında bozunmanın bu aşaması sona erer. İkinci aşama, anaerobik ve fakültatif (uyumlu) organizmaların (asetojenik bakteriler), selüloz ve diğer çürüeyebilen maddeleri hidroliz ve fermente ederek suda çözünebilen daha basit bileşikler (uçucu yağ asitleri vb) oluşturmasını kapsamaktadır. Bu aşamada yüksek miktarda amonyak ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) oluşmaktadır. İkinci aşama, yıllar hatta on yıllar boyunca sürebilir. Bu süreçte oluşan sızıntı suyu, yüksek BOİ miktarına (genellikle  $>10.000\text{mg/L}$ ) ve yüksek BOİ/KOİ (genellikle  $>0.7$ ) oranına sahiptir. Üçüncü ve son aşamada ise yavaş büyüyen metanojenik bakterilerin oluşumu kademe kademe gözlemlenir ve basit organik bileşikleri tüketerek depolama gazı olarak bilinen karbondioksit metan gazları karışımı üretilir. Bu aşamadaki bir düzenli depolama sahasından alınan sızıntı suyu numunesi kararlı (stabil) olarak değerlendirilse de aslında depolama sahasının biyolojik açıdan en aktif olduğu dönemdir (McBean ve ark., 1995, Qian ve ark. 2002). Sızıntı suyu, taşıyıcı sıvı (çözücü) ve içeriğindeki çözülmüş maddelerden (çözünen) oluşur. Sızıntı suyu, katı atıkların içinden süzülerek kimyasal, biyolojik ve fiziksel olaylara maruz kalarak oluşur ve sızıntı suyu toplama sistemleri ile dışarı atılır (Şekil 2.5 ve 2.6).

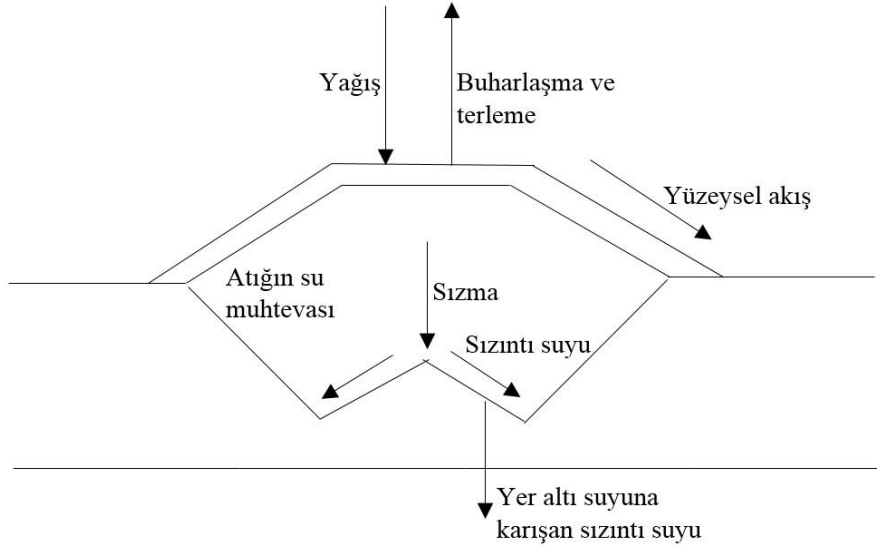
Katı atıkların içinden süzülen sızıntı suyu, katı atıkların içeriğinden kaynaklanan çok sayıdaki element ve bileşiği içerir. Oluşan sızıntı suyunun bileşimi zaman ve mekana göre değişiklikler gösterebilir (Armağan, 2002).



**Şekil 2.5.** Sızıntı suyu oluşumu

Sızıntı suyunun oluşumunu ve karakteristiğini etkileyen faktörler; katı atık bileşimi, katı atığın derinliği, depolama sahasının yaşı, üst örtü, depolama sahasının işletme koşulları (su ekleme, sızıntı suyu sirkülasyonu, atığın sıkıştırılması, katmanların kalınlığı), iklim koşulları, hidrojeolojik koşullar, depolama sahasındaki kimyasal ve biyolojik aktiviteler (nem içeriği, sıcaklık, pH, stabilizasyon derecesi) olarak sıralanabilir. Sızıntı suyu miktarını etkileyen faktörler ise çökelme, atığın karakteristiği ve üst örtü uygulamasıdır. (Qian ve ark., 2002).

Sızıntı suyunun oluşmasındaki başlıca iki kaynak, depolanan atıktaki su içeriği ve dışarıdan depoya giren su miktarıdır. Dışarıdan depoya giren su miktarının kaynakları ise, yağmur sularının depo üzerinden sızması, yüzeysel suların ve yer altı sularının depo üzerinden sızması, yüzeysel suların ve yer altı sularının depoya nüfuz etmesidir (Şekil 2.5) (Yıldız, 2006). Yağış sularının karakteristiği ve miktarı, depolamanın yapıldığı bölgenin iklimsel, hidrolojik ve hidrojeolojik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Sızıntı suyu oluşumunda en az etkili olan kaynak ise atık yığınlarında bulunan bileşenlerden özellikle, organik içerikli olanlarının nemi ve atık içerisindeki biyolojik faaliyetler sonucunda açığa çıkan içsel kaynaklı sulardır. Atık içerisinde suyun tutulmasında yüzey gerilimi kuvvetleri ve kapiler kuvvetler etkili olmaktadır. Bu kuvvetler aracılığı ile tutulan su, atık boşluklarının ve atık yüzeylerinin su tutma kapasitesi aşıldığı anda yer çekimi kuvveti etkisi ile aşağı doğru hareket etmektedir (Demirbilek, 2012).



Şekil 2.6. DDT'lerde su dengesi

Sızıntı suyu içerisinde organik, inorganik ve ağır metal bileşenleri çözülmüş halde bulunur (Çizelge 2.1). Sızıntı suyu düşük miktarlarda fosfor, yüksek miktarlarda amonyum içermektedir, bu nedenle sızıntı suyundaki toplam azotun %60-90'ı amonyum azotundan oluşur. Ağır metallerden özellikle demir ve çinko yüksek derişimlerde bulunurken, krom, nikel, bakır, kadmiyum, kurşun ve diğer ağır metaller demir ve çinkoya göre daha düşük derişimlerde bulunur (Varank, 2010).

Sızıntı suyunda bulunan kirleticiler (organik madde ve ağır metaller) nedeniyle, ön arıtma veya nihai arıtma sistemleri uygulanarak arıtıldıktan sonra deşarj edilmeli ve sızıntı sularının yeraltı sularına karışması engellenmelidir. Kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri oldukça tehlikeli ve çok sayıda olup bunlar; üst solunum yolu hastalıkları, akciğer hastalıkları (zatürre, bronşit, vb), sindirim sistemi hastalıkları (mide ve bağırsak bozuklukları), kalp, damar ve dolaşım sistemi hastalıkları (yüksek tansiyon, çarpıntı, vb), sarılık, alerji, zehirlenme, kanser (akciğer, karaciğer, kan, mide) şeklinde sıralanabilir (Akpınar 2005).

**Çizelge 2.1.** Yeni ve olgun depolama alanları için sızıntı suyu bileşimi (Tchbanoglous ve ark., 1993)

| Bileşen                                   | Değer (mg/L)                  |       |                                 |
|---|-------------------------------|-------|---------------------------------|
|   | Yeni depolama sahası (<2 yıl) |       | Olgun depolama sahası (>10 yıl) |
|   | Aralık                        | Tipik |                                 |
| BOİ                                       | 2000-30000                    | 10000 | 100-200                         |
| TOK                                       | 1500-20000                    | 6000  | 80-160                          |
| KOİ                                       | 3000-60000                    | 18000 | 100-500                         |
| Askıda katı madde                         | 200-2000                      | 500   | 100-400                         |
| Organik azot                              | 10-800                        | 200   | 80-120                          |
| Amonyak azotu                             | 10-800                        | 200   | 20-40                           |
| Nitrat                                    | 5-40                          | 25    | 5-10                            |
| Toplam fosfor                             | 5-100                         | 30    | 5-10                            |
| Orto fosfor                               | 4-80                          | 20    | 4-8                             |
| Alkalinite (CaCO <sub>3</sub> olarak)     | 1000-10000                    | 3000  | 200-1000                        |
| pH  | 4.5-7.5                       | 6     | 6.6-7.5                         |
| Toplam sertlik (CaCO <sub>3</sub> olarak) | 300-10000                     | 3500  | 200-500                         |
| Kalsiyum                                  | 200-3000                      | 1000  | 100-400                         |
| Magnezyum                                 | 50-1500                       | 250   | 50-200                          |
| Potasyum                                  | 200-1000                      | 300   | 50-400                          |
| Sodyum                                    | 200-2500                      | 500   | 100-200                         |
| Klorür                                    | 200-3000                      | 500   | 100-400                         |
| Sülfat                                    | 50-1000                       | 300   | 20-50                           |
| Toplam demir                              | 50-1200                       | 60    | 20-200                          |

Sızıntı suyu toplama ve ayırma sistemi, geçirimsiz tabakanın üzerinde sızıntı suyu birikimini engelleyerek tabaka üzerinde oluşabilecek basıncı azaltması açısından son derece önemlidir. Sızıntı suyunun toplanarak arıtma tesisine gönderilmek üzere depolama tankına aktarılma işlemi bu sistem sayesinde tamamlanmaktadır. Sızıntı suyunun yeraltı sularına karışmasını engellemek adına projelendirilen ilk sistem, drenaj sistemidir. Sızıntı suyunun drenaj yöntemi ile kontrol edilmesi, su seviyesinin istenmeyen yüksek değerlere ulaşmasını engeller, depo taban ve kenar geçirimsiz örtülerinden sızma riskini düşürür, sızıntı suyu ve geçirimsiz örtü arasındaki kimyasal etkileşimi minimuma indirir, depo sahasının depo gazı üretmek kimyasal ve biyolojik açıdan stabil hale gelme sürecini olumlu yönde etkiler ve atık yığınının stabilitesinin korunmasını sağlar (Jessberger ve ark., 1993). Oluşan sızıntı suyunun toplanması için üç farklı drenaj sistemi mevcuttur; **alan drenajı**, **boru drenajı** ve **birleşik drenaj**.

Mineral maddeden oluşan geçirimsiz tabaka, yağmur erozyonuna ve güneş ışınlarına karşı korunmalıdır, çünkü güneş ışığı ile kil tabakası kuruyup çatlayabilmektedir. Bu nedenle, geçirimsiz tabakanın inşaatından hemen sonra



alan drenajı yapılmalıdır. Boru drenaj sisteminde ise sızıntı suyunun toplanması borular ile gerçekleştirilir. Borularla drenaj yapılması halinde dahi alan drenajı gereklidir çünkü, kuvvetli sağanak yağışlarda, güneşli havalarda mineral tabaka korunamayabilir. Birleşik drenaj sisteminde ise alan drenajı ile boru drenajı birlikte kullanılmaktadır. Drenajın en sağlıklı yapılabileceği sistem, birleşik drenaj sistemidir. Sızıntı suyu drenajı için depolama sahalarında yapılması gerekli olan mühendislik çalışmaları:

- Drenaj amaçlı granül malzeme (çakıl) kullanılmalıdır. Temiz çakıl, mümkünse yuvarlak şekilli kullanılmalıdır.
- Tabanın dikey istikamette eğimi %2'den büyük olmalıdır.
- Taban yanal eğimi en az %1 olmalıdır.
- Yüksek poroziteli drenaj tabakası oluşturulmalıdır.
- Büyük hacimli ve filtre stabilitesi olan malzeme kullanılmalıdır.
- Drenaj boruları arası mesafe kısa olmalıdır (50—60 m).
- Drenaj tabakası üzeri uygun atıkla en az 2 m kalınlığında örtülmelidir.
- Paralel toplama hatları oluşturulmalıdır.
- Boru çapı 150 mm'den büyük olmalıdır.
- Drenaj tabakası kalınlığı 30 cm'den büyük olmalıdır.
- Boru yönleri, depo şartlarında oluşacak basınçlara göre tasarlanmalıdır.
- İlk atık tabakası konduktan sonra drenaj boruları video kamerayla kontrol edilmelidir (Yıldız, 2006).

Sızıntı suları çok yüksek kirlilik içermediği durumlarda, genellikle şehir kanalizasyon şebekesine direkt deşarj edilebilmektedir. Eğer sızıntı suyunun kirlenici içeriği 2004 yılında yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) çerçevesinde belirlenmiş olan deşarj limitlerinin (Çizelge 2.2) üzerindeyse, artırılması gerekmektedir.

**Çizelge 2.2.** Katı atık bertaraf tesisleri için deşarj standartları (SKKY 2004)

| PARAMETRE                             | BİRİM   | KOMPOZİT<br>NUMUNE<br>2 SAATLİK | KOMPOZİT<br>NUMUNE<br>24 SAATLİK |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------|----------------------------------|
| KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)       | (mg/L)  | 700                             | 500                              |
| TOPLAM KJELDAHL-AZOTU                 | (mg/L)  | 20                              | 15                               |
| ASKIDA KATI MADDE (AKM)               | (mg/L)  | 200                             | 100                              |
| YAĞ VE GRES                           | (mg/L)  | 20                              | 10                               |
| TOPLAM FOSFOR (P)                     | (mg/L)  | 2                               | 1                                |
| TOPLAM KROM                           | (mg/L)  | 2                               | 1                                |
| KROM (Cr <sup>+6</sup> )              | (mg/L)  | 0.5                             | 0.5                              |
| KURŞUN (Pb)                           | (mg/L)  | 2                               | 1                                |
| TOPLAM SİYANÜR (CN <sup>-</sup> )     | (mg/L)  | 1                               | 0.5                              |
| KADMİYUM (Cd)                         | (mg/L)  | 0.1                             | -                                |
| DEMİR (Fe)                            | (mg/L)  | 10                              | -                                |
| FLORÜR (F <sup>-</sup> )              | (mg/L)  | 15                              | -                                |
| BAKIR (Cu)                            | (mg/L)  | 3                               | -                                |
| ÇİNKO (Zn)                            | (mg/L)  | 5                               | -                                |
| BALIK BİYODENEYİ (ZSF)                | -       | 10                              |                                  |
| pH                                    | -       | 6-9                             | 6-9                              |
| (Ek satır:RG-24/4/2011-27914)<br>Renk | (Pt-Co) | 280                             | 260                              |

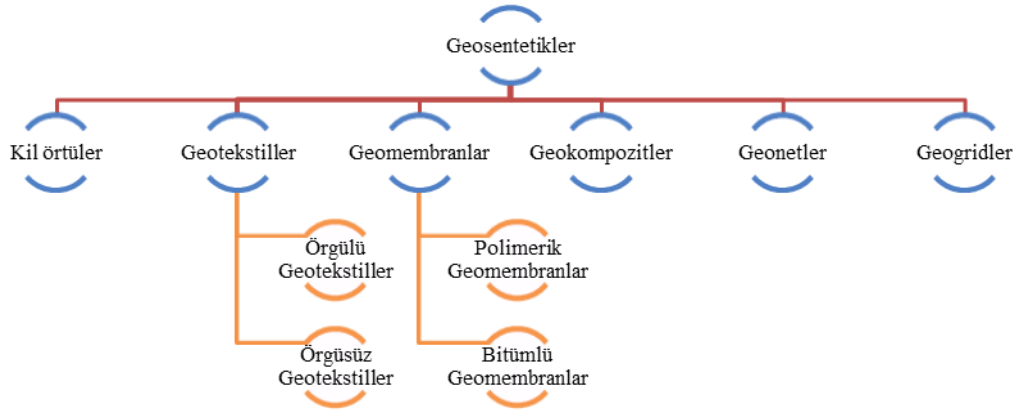
## 2.2. Geçirimsiz Tabaka

Düzenli depolama sahaları genel anlamda atığın tamamının kapatılarak çevreden izole edilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda iki temel yaklaşım göz önüne alınmaktadır: üst örtü ve yüzey drenaj sistemi ile depolama sahasında oluşan sızıntı suyunun minimize edilmesi ve sızıntı suyu toplama sistemi ve geçirimsiz tabaka ile oluşan sızıntı suyunun çevreye sızmasının engellenmesi (Reddi ve Inyang, 2000). Dolayısıyla bir depolama sahasının temel unsurları, taban ve kenar geçirimsizliği, sızıntı suyu toplama ve ayırma sistemleri, gaz toplama, izleme ve kontrol sistemleri, üst örtü, yer altı suyu kontrol ve izleme sistemleridir.

Depolama sahasının kurulum aşamalarından ilki ve en önemlisi, sızıntı suyunun toplanarak sızmasını engellemek için geçirimsiz tabaka sistemi oluşturulmasıdır. Geçirimsiz tabaka, sızıntı suyu karşısında bir bariyer görevi görerek sızıntı suyu çözünenlerinin hidrolik ve difüzyon hareketlerini engellemektedir. Bu bariyer, sıkıştırılmış kil tabakası, geomembran, geosentetik

kil tabakası ve/veya bunların kombinasyonlarından oluşmaktadır. Geçirimsiz tabaka, düzenli depolama sahasının en önemli ögesidir. Kullanılmakta olan geçirimsiz tabakaların genel adı **geosentetik bariyerler**dir.

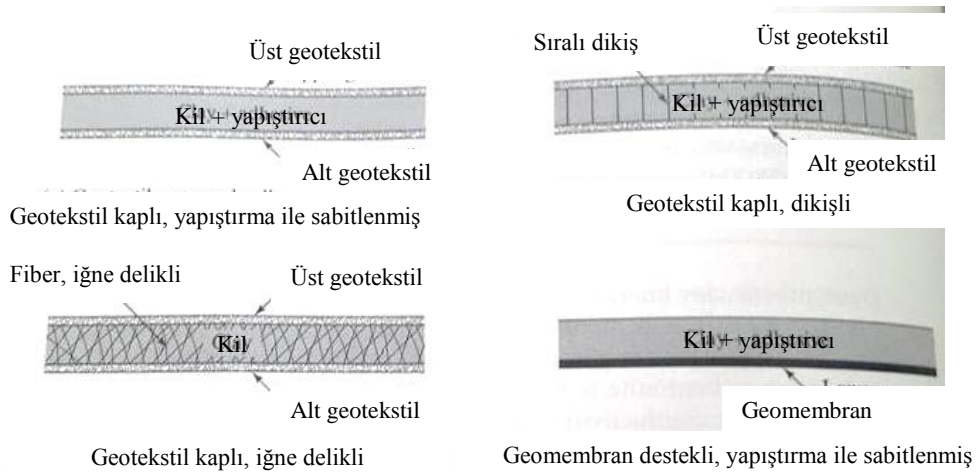
ASTM D4439, geosentetiği “bir inşaat projesi, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan, polimerik malzemelerden üretilen düzlemsel ürünler” şeklinde tanımlamaktadır (Yılmaz ve Eskişer, 2007). Geosentetik malzemeler, zemin iyileştirme, atık alanları, bitüm, demiryolu zemini güçlendirilmesi, istinat yapıları, erozyon, şev kontrolü, su, nem yalıtımı, baraj, marina, kanal, gölet gibi hidrolik yapılardan, drenaj işleri gibi birçok farklı alanda kullanılan malzemelerin genel ismi olup, geosentetiklerin sınıflandırılması Şekil 2.7’de verilmiştir. Geotekstilller, geogridler, geomembranlar, geonetler, geokompozitler ve geosentetik kil kaplamaları da kapsamına alan geosentetikler, geleneksel malzemelerle birlikte kullanılmakta ve yer kazanma, malzeme kalite kontrolü, üretim kalite kontrolü, maliyet kazanımları, teknik üstünlük, inşaat süresini kısaltma, malzemede gelişim, malzemede tedarik edilebilirlik ve çevresel duyarlılık gibi avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 2.7. Geosentetiklerin sınıflandırılması (Rawal ve ark. 2010)

**Geosentetik kil örtüler** (GCL) iki geotekstil arasına yaklaşık 5 kg/m<sup>2</sup> bentonit sıkıştırılarak (sandviç modeli) veya aynı miktarda bentonit bir geomembranın üzerine yapıştırılarak oluşturulan ince hidrolik bariyerlerdir.

Bariyerde kullanılan geosentetik katmanların görevi, bentoniti düzgün bir tabaka halinde tutmak ve bentonit kaybı olmadan, bentonit kil örtünün nakliye ve yerleştirilmesini sağlamaktır. Geosentetik katmanlar, dikme, iğne ile delme veya yapıştırıcı bir bağ kullanma yöntemleri ile kil tabakasına tutturulmaktadır. Geosentetik kil örtü tabakaları yapılarına göre 4 gruba ayrılırlar (Şekil 2.8). Bunlar, geotekstil kaplı, yapıştırma ile sabitlenmiş GCL; geotekstil kaplı, dikiş ile sabitlenmiş GCL; geotekstil kaplı, iğne ile delinerek sabitlenmiş GCL ve geomembran destekli, yapıştırma ile sabitlenmiş GCL'dir (Qian ve ark., 2002).



Şekil 2.8. Geosentetik kil örtü (GCL) çeşitleri

Geosentetik kil örtülerde kullanılan bentonit, sodyum bentonit veya kalsiyum bentonittir, bentonit kili granül veya toz halinde kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış kil tabakalarına alternatif olarak üretilen geosentetik kil örtü tabakaları, daha az yer kaplar, esnektir, uygulama alanına yerleştirilmesi kolaydır ve en önemlisi kendi kendini onarma yeteneğine sahiptirler.

**Geotekstiller**, ASTM D4439 tarafından “bir inşaat projesi, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan geçirimli tekstil ürünü” olarak tanımlanırlar (Yılmaz ve Eskişer, 2007). Üretim tekniği açısından örgülü geotekstiller ve örgüsüz geotekstiller olmak üzere iki gruba ayrılırlar ve genel olarak ayırma, filtrasyon, drenaj, güçlendirme, koruma ve yalıtım sağlamak amacıyla kullanılırlar (Qian ve ark., 2002).

**Geokompozitler**, iki ya da daha fazla geosentetik malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, her iki geosentetiğin de görevini yerine getiren ve genellikle bir geotekstil ile bir geogridin birlikte kullanıldığı malzemelerdir. Geogrid malzeme ile güçlendirme, geotekstil ile de ayırma ve filtrasyonun gerçekleşmesi sağlanır. Aynı zamanda, sert geogridlerin serim sırasında kabarma ve serme makinasının altına takılması nedeniyle meydana gelen bükülmeler, tekstil eklenerek oluşturulmuş geokompozitlerde giderilerek, serim ve uygulama kolaylığı da sağlanmaktadır (Güngör ve ark., 2009).

**Geonetler**, drenaj sağlamak amacıyla, ince plastik levhaların açık aralıklı bir ağ görünümünde olacak şekilde işlenmesi veya dikilmesi ile oluşturulurlar. Böylece, aralıklı kanallar arasında sıvı veya gazın hareket etmesi sağlanır. Geonetin uygulandığı zeminin veya diğer yakın malzemelerin geonet içerisine girişini engellemek için, geonet bir geotekstil kullanılarak pekiştirilmelidir (Akbulut ve Sağlamer, 1999).

**Geogridler**, 1-7 cm aralığında uzunluğu olan deliklerle bezenmiş, açık ızgara şeklinde, yüksek dayanıklı zemin destek ürünleridir. Genellikle bir zemin duvar yapısını, bir şevi dikleştirmek ve stabil hale getirmek için veya toprak setleri altında kalan zayıf zemin yüzeylerinin taşıma kapasitesini artırmak için kullanılırlar (Akbulut ve Sağlamer, 1999).

### 2.2.1. Geomembran

**Geomembran**, ASTM D4439 tarafından “*geoteknik mühendisliği ile ilgili insan yapısı bir proje, yapı ve sistemde sıvı akımını kontrol altına alabilecek kadar düşük geçirgenlikte asfalt, polimer veya bunların karışımından üretilen, sürekli membran tipi kaplama ve izole bariyeri*” olarak tanımlanırken, ISO’ya göre de “*geoteknik ve mühendislik uygulamalarında bir yapı içerisine sıvı geçişini azaltmak veya önlemek amacıyla kullanılan düşük geçirimli geosentetik bariyerler*” şeklinde ifade edilmektedir.

Her iki tanımda da belirtildiği üzere geomembranlar, saha uygulamalarında esas olarak geçirimsizliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Günümüzde geomembranlar, çevre, geoteknik ve hidrolik

alanlarında, doğal kil veya diğer geçirimsizlik tabakalarının kullanımının mümkün veya yeterli olmadığı durumlarda uygulanmakta olan geosentetik bariyerlerdir. Başlıca kullanım alanları; katı ve sıvı atık depolama sahaları, barajlar ve su kanalları, tüneller, şişen ve hassas zeminlerin kontrolü, bitüm üst kaplamaların altı, çatı yalıtımları şeklindedir.

Geomembran malzemelerin boşluksuz yapıları nedeniyle esas fonksiyonu olan sıvı ve gaz geçişini engellemenin yanı sıra, yapılarındaki malzeme özellikleri sayesinde aşağıdaki fonksiyonları da yerine getirmektedirler (Ay, 2014):

- Kimyasal maddelere karşı yüksek dirençli olduklarından, çevrelediği yapıyı kimyasal etkilere karşı koruyucudur.
- Esnek yapısı sayesinde mekanik darbelere yüksek dayanım gösterir, üzerine gelecek darbeleri emerek yapıya olan etkisini azaltırlar.
- Çekme ve uzama mukavemeti yüksektir, bu sayede, kısmi hareket ve titreşimlerin etkili olduğu yapılara kısmi hareket esnekliği sağlar.
- Su ve nem geçirimsiz yapısı sayesinde, etrafını sardığı yapıda korozyona uğrayabilecek malzemeleri koruyarak korozyonu önler.

Literatürde, geomembranlar ile ilgili, geosentetik bariyer (GBR) ve esnek membran tabaka (FML) terimleri de kullanılmaktadır. Geçirimsiz tabaka olma özelliği nedeniyle geomembranlar, katı atık depolama sahalarında oluşan sızıntı suyunun içerdiği organik ve inorganik kirletici geçişini engellemek amacıyla taban ve üst örtü tabakası olarak sıkça kullanılmaktadır (Berger ve ark., 2002). Kompozit ve tek tabakalı taban sistemlerinden kirletici geçişi ile ilgili yapılan çalışmalarda önceleri, sızma hızında advectif geçiş baz alınırken, artık etkin olan mekanizmanın difüzyif geçiş (kirletici geçişinin taban örtüsünün üst ve alt kısımları arasındaki derişim farkına bağlı olarak gerçekleşmesi) olduğu, adveksiyonun (kirletici geçişinin kil boyunca su akışı ile gerçekleşmesi) ihmal edilebilecek derecede önemsiz kaldığı kabulleri yapılmıştır (Varank, 2010). Hem advectif hem difüzyif geçişi önleyebilecek şekilde geçirimsiz kabul edilen geomembranlar bu özellikleri sayesinde katı atık depolama sahalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sıvı atıkların veya katı atıklardan kaynaklanacak sızıntı sularının yer altı sularına karışarak kirletmesini önlemek üzere atık depolama alanının zemini geomembran kaplamanın yanı sıra geçirimsiz kil tabakasıyla da

oluşturulabilmektedir. Ancak depolama alanının üst bölümünden yaşanabilecek sızma ve taşmaların önlenmesi amacıyla yapılan üst yüzeyde, geçirimsiz kil tabakasını oluşturmak üzere gerekli basınç uygulaması yapılmasının sağlıklı olmayacağı düşünülmektedir. Bu sebeple kil tabakaların kuruma, donma ve çatlama gibi durumlarda onarımı zor olacağından, depo kaplamalarında geçirimsiz kil tabakası yerine bir veya iki geomembran kullanılması tavsiye edilmektedir (Akbulut, 2003).

Geomembran malzemelerinin her türü farklı performansa; dolayısıyla farklı dayanıklılık ve kullanım ömürlerine sahiptir. Bir uygulamanın tasarımı aşamasında iyi ve doğru malzeme seçimi ve sonrasında başarılı uygulama yöntemi ile sorunsuz bir geçirimsizlik sistemi oluşturulabilmektedir. Bu nedenle uygulama için gerekli özelliklerin belirlenerek uygulamanın gereksinimlerini karşılayacak doğru geomembran ürününün seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde uygulamadan bir süre sonra geçirimsizlik sisteminde yırtılma, delinme, bozunma, çatlama gibi çözümü zor sorunlar meydana gelmektedir. Geomembranlar, kimyasal dirençleri, mekanik özellikleri (elastik modülü, sünme dayanımı, yırtılma/delinme direnci v.b.) ve hava koşullarına karşı bozulma dirençleri göz önüne alınarak seçilmektedir. Geomembranlar birçok farklı türde bulunmakla beraber, temel olarak iki gruba ayrılırlar: **polimerik geomembranlar** ve **bitümlü geomembranlar**.

#### **2.2.1.1. Polimerik geomembranlar**

Polimerik geomembranlar, esnek polimer levhalar halinde üretilen geçirimsiz astarlardır. Polimerik geomembranların karakteristik özellikleri polimerin yapısına (polimer zincirinin yapısı), molekül ağırlığına (polimer zincirinin uzunluğu) ve kristalliğine (zincirlerin yoğunluğu) bağlıdır. Polimerik geomembranlar iki ana gruba ayrılır: termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler eritilip tekrar şekil verilebilirken, termosetler çapraz bağa sahip oldukları için polimerin yapısını bozmadan eritmek mümkün değildir. Bu nedenle termoplastiklerin kendi kendini tamir etme gibi bir avantajı varken, termosetlerin en önemli avantajı ise çok uzun ömürlü malzemeler olmalarıdır. Polimerik

geomembranların en yaygın türleri, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), lineer alçak yoğunluklu polietilen (LLDPE), çok esnek polietilen (VFPE), polivinil klorür (PVC), klorosülfone (güçlendirilmiş) polietilen membran (CSPE) ve etilen propilen dien monomer (EPDM) membranlardır (Scheirs, 2009).

### **2.2.1.2. Bitümlü geomembranlar**

ASTM D4439'un tanımına göre *“bitümlü geomembranlar (BGM), bir sentetik örtünün, mineral stabilizatör içeren, oksidize veya modifiye edilmiş bitüm ile tamamen doyurularak kaplanması ile elde edilen, bir fabrika ortamında üretilen malzemelerdir.”*

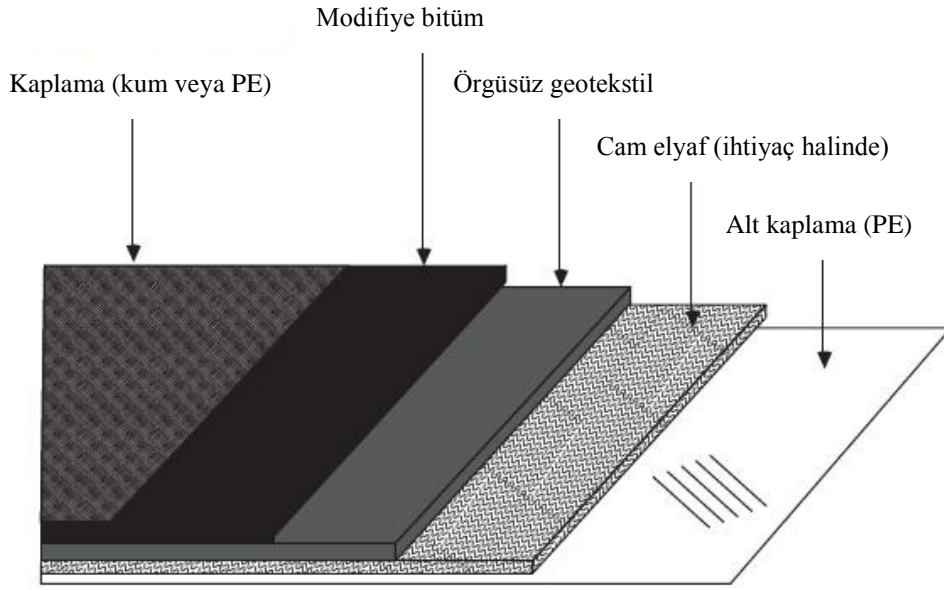
Başka bir deyişle bitümlü geomembranlar, sabit kalınlıkta, örgüsüz türden bir geotekstilin tamamen bitümle kaplanarak esnek, mekanik dayanıma sahip ve geçirimsiz bir tabaka oluşturmak üzere elde edilen geosentetik bariyerlerdir (GBR-B). Taşıyıcı olarak kullanılan örgüsüz geotekstil türleri, cam elyaf ve polyesterdir. Kullanılan taşıyıcı türü, üretilen geomembranın çekme dayanımı, uzama gerilimi, delinme dayanımı ve yırtılma dayanımı gibi mekanik özelliklerini belirler (Scheirs, 2009).

Taşıyıcının etrafını kaplayan sıcak bitüm karışımı, gerekli hallerde bitümün polimerler ile modifiye edilmesi ve genellikle “filler” denilen dolgu malzemesinin eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Mineral dolgu malzemesi, agregaların kırılıp elenerek küçük parçalara ayrılması sonucunda meydana gelen mineral tozları, uçucu kül ve kireçlerden oluşabilmektedir. Dolgu malzemelerinin kullanım amacı, sertliği veya güçlendirmeyi sağlamanın yanı sıra karışım içerisindeki boşlukların doldurulmasıdır. Dolgu malzemelerinin karışıma katılması, güçlenme ve takviye amaçlı olmakla birlikte, bitüm karışımının tümünde bir performans gelişmesi görülür. Dolgu malzemesinin mineralojik çeşitliliği ve dane dağılımları göz önüne alınması gereken önemli noktalardandır. Genel anlamda No:200 (0.075 mm) elekten geçen malzemeler, “filler” olarak adlandırılır. Filler sadece kalsit gibi doğal agregalardan değil, kireç, lignin, sülfür ve çok ince kesilmiş, ufalanmış fiber parçacıklardan da oluşturulabilmektedir (Geçkil, 2013). Doğal agrega olan kalsit taşı, kırma, öğütme ve ayırma



işlemlerinden geçerek mikronize hale getirilir. Mikronize hale getirilen  $\text{CaCO}_3$ , kaplanarak ya da doğal haliyle dolgu malzemesi olarak, birçok farklı sektör tarafından kullanılmaktadır.

Saha uygulamalarındaki uygulamayı yapan kişinin geomembran üzerinde yürümesi sırasında malzemeye zarar vermesiyle oluşabilecek yüzey bozulmalarından kaçınmak amacıyla, geomembran henüz sıcakken üzeri ve altı kum veya polietilen film ile kaplanabilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Bitümlü geomembranın yapısı

Polimerik geomembranlarla kıyaslandığında, bitümlü geomembranların en büyük avantajı, herhangi bir antioksidan veya stabilizatöre ihtiyaç duymaksızın, oksidasyona ve UV ışınlarına karşı çok yüksek direnç göstermeleridir. Bitümün yapısını oluşturan polisiklik aromatik hidrokarbonlar, bitümlü geomembranların hava şartlarına bağlı aşınma ve oksidasyona karşı kararlı bir yapıda olmasını sağlamaktadır. Uygulama sırasında göze çarpan başka bir avantaj ise, bitümlü geomembranların ısı ile kaynak yapılmaya müsait olmasıdır. Bu avantaj hem uygulama kolaylığı sağlamakta, hem de kaynak hatası nedeniyle oluşabilecek sızıntı riskini minimize etmektedir. Modifiye bitümün viskoelastik yapısı, geomembranda zamanla oluşması muhtemel gerilme, delinme gibi kusurların kendi kendine iyileştirilmesini sağlamaktadır. Bitümün viskoz yapısı ile örgüsüz

geotekstilin çekme özellikleri bir araya getirildiği için, bitümlü geomembranlar diğerlerine göre daha yüksek gerilmelere dayanıklı hale gelmektedirler. Polimerik geomembranlar, bitümlü geomembranlara göre daha ekonomik olsa da, iyileştirilmiş özellikleri ve uygulamadaki kolaylıkları ile bu fark dengelenmektedir. Bitümlü geomembranların genel özellikleri Çizelge 2.3’de gösterilmiştir (Scheirs, 2009).

**Çizelge 2.3.** Bitümlü geomembranların genel özellikleri

| Özellik                 | Değer                 |
|-------------------------|-----------------------|
| Kalınlık                | 3,8 mm                |
| Birim alan kütlesi      | 4 kg/m <sup>2</sup>   |
| Yoğunluk                | 1,1 g/cm <sup>3</sup> |
| Çekme dayanımı          | 22,8 kN/m             |
| Kopma uzaması           | %50                   |
| Yırtılma dayanımı       | 165 N                 |
| Statik delinme dayanımı | >2 kN                 |
| Soğukta bükülme         | -15°C                 |
| Boyutsal kararlılık     | >+0,2%                |

Yaygın olarak kullanılan polimerik geomembranlara göre oldukça kalın olan (3-5 mm) bitümlü geomembranlar, bu karakteristik özellikleri sayesinde uygulama anında oluşabilecek hasarlara dayanıklıdırlar. Yine diğer geomembranlara göre yüksek birim alan kütlesine (3.5-6 kg/m<sup>2</sup>) sahip olmaları, kuvvetli rüzgarlardan etkilenmemelerini sağlar. Bu da bitümlü geomembranların yalnızca depolama sahası tabanında değil, üst örtü olarak veya çatı yalıtımında da kullanım alanı bulmasını sağlamaktadır.

### 2.3. Ulusal Mevzuat

Ülkemizde katı atıkların toplanması, taşınması ve geri kazanılması ile çevre ve insan sağlığına olumsuz etki yapmadan nihai bertarafına ilişkin yükümlülük, yetki ve sorumluluklar 5393 sayılı ve 03.07.2005 tarihli Belediye Kanunu’nda, belediyelerin görev ve sorumlulukları yeniden belirlenmesi gerekçesi ile eklenen 14. Maddesinde düzenlenmiştir. Söz konusu maddeye göre “*Belediye, imar, su ve kanalizasyon, ulaşım gibi kentsel alt yapı, coğrafi ve kent bilgi sistemleri; çevre ve çevre sağlığı, temizlik ve katı atık; zabıta, itfaiye, acil*

yardım, kurtarma ve ambulans; şehir içi trafik; defin ve mezarlıklar; ağaçlandırma, park ve yeşil alanlar; konut; kültür ve sanat, turizm ve tanıtım, gençlik ve spor; sosyal hizmet ve yardım, nikah, meslek ve beceri kazandırma; ekonomi ve ticaretin geliştirilmesi hizmetlerini yapar veya yaptırır.” hükmü ile katı atıklara ilişkin yükümlülük, yetki ve sorumluluklar belediyelere bırakılmıştır. Aynı kanunun 15. Maddesinin g bendine göre “Katı atıkların toplanması, taşınması, ayrıştırılması, geri kazanımı, ortadan kaldırılması ve depolanması ile ilgili bütün hizmetleri yapmak ve yaptırmak” belediyelerin yetkisindedir.

5491 sayılı Kanun ile Değişik 2872 Sayılı Çevre Kanunu’nun 8.maddesinde “Her türlü atık ve artığı, çevreye zarar verecek şekilde, ilgili yönetmeliklerde belirlenen standartlara ve yöntemlere aykırı olarak doğrudan ve dolaylı biçimde alıcı ortama vermek, depolamak, taşımak, uzaklaştırmak ve benzeri faaliyetlerde bulunmak yasaktır. Kirlenme ihtimalinin bulunduğu durumlarda ilgililer kirlenmeyi önlemekle; kirlenmenin meydana geldiği hallerde kirlen, kirlenmeyi durdurmak, kirlenmenin etkilerini gidermek veya azaltmak için gerekli tedbirleri almakla yükümlüdürler.” hükmü bulunmaktadır. Aynı kanunun 11. Maddesinde belirtildiği üzere, Büyükşehir belediyeleri ve belediyeler evsel katı atık bertaraf tesislerini kurmak, kurdurmak, işletmek veya işletmekle yükümlüdürler.

Çevre Kanunu’nun yukarıda bahsedilen hükümlerine dayanılarak hazırlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği (02.04.2015, R.G. No:29314), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın, il müdürlüklerinin, belediyelerin, atık üreticisinin ve atık sahibinin ve atık işletme tesislerinin görev, yetki, sorumluluk ve yükümlülüklerinin tamamını içermektedir. Atık Yönetimi Yönetmeliği’nin hazırlanmasındaki amaç, atıkların oluşumundan bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeksizin yönetimlerinin sağlanmasına yönelik genel esasların belirlenmesidir.

26.03.2010 tarihinde yayınlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY) ise, atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde, oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının toprak, hava, yeraltı suları ve yüzeysel suların üzerindeki olumsuz etkilerinin asgari düzeye indirilerek çevre kirliliğinin önlenmesine, atıkların türüne göre uygun depo tabanı teknik

tasarımlarının yapılması ve düzenli depolama tesislerinin inşa edilmesine, düzenli depolama tesislerine atık kabulü işlemlerine, düzenli depolama tesislerinin işletilmesi, kapatılması ile kapatma sonrası kontrol ve bakım süreçlerine; işletme, kapatma ve kapatma sonrası bakım süreçlerinde sera etkisi de dâhil olmak üzere çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil edebilecek olumsuzlukların önlenmesine, mevcut düzenli depolama tesislerinin ıslahı, kapatılması ve kapatma sonrası bakım süreçlerine ilişkin teknik ve idari hususlar ile uyulması gereken genel kuralları belirlemektedir. Yönetmelikte düzenli depolama tesisi (DDT), “atıkların oluştuğu tesis içinde geri kazanım, ön işlem veya bertarafa gönderilmek üzere geçici depolandığı birimler, atığın geri kazanım veya ön işleme tabi tutulmak amacıyla üç yıldan daha kısa süreli ara depolandığı tesisler ile atığın bertaraf işlemine tabi tutulmak üzere bir yılı geçmeyecek şekilde ara depolandığı tesisler hariç olmak üzere atıkların yeraltı veya yer üstünde belirli teknik standartlara göre bertaraf edildiği sahaları” olarak tanımlanmaktadır.

Yönetmeliğe göre düzenli depolama tesisleri 3 sınıfa ayrılmaktadır:

- **I. sınıf düzenli depolama tesisi:** Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.
- **II. sınıf düzenli depolama tesisi:** Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.
- **III. sınıf düzenli depolama tesisi:** İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

Düzenli depolama tesislerinin depo tabanının teşkili, ADDDY’in 16. Maddesi ile belirlenen hususlara göre gerçekleştirilmektedir. 16. Madde uyarınca, düzenli depolama tesisinin tabanı ve yan yüzeylerinde, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde bir geçirimsizlik tabakası teşkil edilir. Bunun için kil veya eşdeğeri malzemedan oluşturulmuş geçirimsizlik tabakası serilir. Geçirimsizlik tabakasının fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özellikleri depolama tesisinin toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel riskleri önleyecek nitelikte olmak zorundadır. Geçirimsizlik malzemeleri teknik özellik bakımından Türk Standartları Enstitüsü standartlarına uygun olmalıdır (Çizelge 2.4).

**Çizelge 2.4.** Düzenli depolama tesislerinde kullanılan sızdırmaz malzemeler ile ilgili standartlar

| <b>Standard no</b> | <b>Standardın adı</b>  |
|--------------------|--|
| <u>TS EN 13257</u> | Geotekstillere ve Geotekstille İlgili Mamuller-Katı Atık Depolama Alanlarında Kullanım İçin Gerekli Özellikler   |
| TS EN 13257/AC     | Geotekstillere ve Geotekstille İlgili Mamuller - Katı Atık Depolama Alanlarında Kullanım İçin Gerekli Özellikler |
| TS EN 13257/ A1    | Geotekstillere ve Geotekstille İlgili Mamuller - Katı Atık Depolama Alanlarında Kullanım İçin Gerekli Özellikler |
| <u>TS EN 13493</u> | Geosentetik Bariyerler - Katı Atık Depolama ve Bertaraf Etme Yerlerinde Kullanım İçin Gerekli Özellikler         |

Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre depo tabanının asgari aşağıda belirtilen geçirgenlik ve kalınlık özelliklerine sahip olması gerekir:

- I. sınıf düzenli depolama tesisi:  $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$  m/sn; kalınlık  $\geq 5$  m veya eşdeğeri,
- II. sınıf düzenli depolama tesisi:  $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$  m/sn; kalınlık  $\geq 1$  m veya eşdeğeri,
- III. sınıf düzenli depolama tesisi:  $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$  m/sn; kalınlık  $\geq 1$  m veya eşdeğeri.

Jeolojik geçirimsizlik tabakasının yukarıda verilen koşulları doğal olarak sağlayamaması halinde; bu tabaka yapay olarak oluşturulur ve geomembran kullanılarak güçlendirilir. Geçirimsiz mineral malzeme ile yapay olarak oluşturulacak geçirimsizlik tabakasının toplam kalınlığı 0,5 metreden az olamaz.

### 3. BOR BİLEŞİKLERİNİN ÜRETİMİ VE ATIK OLUŞUMU

Bor elementi, periyodik çizelgede B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,811 g/mol olan, yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Periyodik cetvelin 3A grubunun ilk ve en hafif üyesidir. Bor elementi  $^8\text{B}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{12}\text{B}$ ,  $^{13}\text{B}$  izotoplarından oluşmaktadır. En kararlı izotopları  $^{10}\text{B}$  ve  $^{11}\text{B}$ 'dir. Bu kararlı izotopların doğada bulunma oranları sırasıyla %19.1-20.3 ve %79.7-80.9'dur.  $^{10}\text{B}$  izotopu, çok yüksek termal nötron tutma özelliği gösterir. Böylelikle nükleer malzemeler ve nükleer enerji santrallerinde kullanılabilir. Türkiye'de  $^{10}\text{B}$  izotop oranı yüksek, bor cevher yatakları bulunmaktadır (http-2).

Kristalize bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Bor mineralleri birisi, amorf, altısı kristalin polimorf olmak üzere çeşitli allotropik formlarda bulunmaktadır. Alfa ve beta rombohedral ise kristal polimorfun en çok kullanılan formlarıdır. Morfolojisi ve tane büyüklüğü bor elementinin kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Mikron boyuttaki amorf bor, kolaylıkla veya bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristal bor kolaylıkla reaksiyona girmez. Bor, su ile yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur. Bor yanıcıdır, fakat tutuşma sıcaklığı yüksektir. Buna ilaveten yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi bir özelliğe sahip olduğundan dolayı, katı yakıt hücresi olarak kullanılmaktadır (http-3). Amorf bor, siyah ve kahverengi toz şeklinde bulunurken, kristal bor ise siyah, sert ve kırılmandır.

Bor elementi, doğada 250'den fazla mineralin yapısı içinde yer almasına rağmen, ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum, magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunur. Bor mineralleri, içerik olarak değişik oranlarda bor oksit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) içeren mineraller olup, ticari önemi bulunan bor minerallerinin değerleri, içerdikleri  $\text{B}_2\text{O}_3$  ile doğru orantılıdır. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri Çizelge 3.1' de belirtilmiştir (Demir, 2006).

**Çizelge 3.1.** Ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri

| Yapı                     | Mineral      | % B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Bulunduğu yerler               |
|--------------------------|--------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Sodyum Borat             | Tinkal       | 36,5                            | Kırka, Emet, Bigadiç, ABD      |
|                          | Kernit       | 51,0                            | Kırka, ABD, Arjantin           |
| Kalsiyum borat           | Kolemanit    | 50,8                            | Emet, Bigadiç, ABD             |
|                          | Pandermit    | 49,8                            | Sultançayır, Bigadiç           |
| Sodyum-kalsiyum borat    | Üleksit      | 43,0                            | Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin |
|                          | Probertit    | 49,6                            | Kestelek, Emet, ABD            |
| Magnezyum-kalsiyum borat | Hidroborasit | 50,5                            | Emet                           |

Dünyadaki önemli bor rezervleri, Türkiye, Rusya, ABD ve Güney Amerika olmak üzere 4 bölgede bulunmaktadır. Türkiye, 953.300.000 ton rezerv ile dünyadaki bor rezervinin %72,8'ine sahiptir. Dünya bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı Çizelge 3.2'de gösterilmiştir (Bor Sektör Raporu, 2014).

2014 yılında Dünya bor üretim kapasitesinin 5.600.000 ton (2.600.000 ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) olduğu tahmin edilmektedir. Kurulu bor üretim kapasitelerine göre (Çizelge 3.3) Türkiye, 1.086.000 ton kapasite ile dünyada birinci konumdadır (Bor Sektör Raporu, 2014).

**Çizelge 3.2.** 2014 yılı dünya bor rezervleri

| Ülkeler    | Toplam rezerv (bin ton B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Dağılım (%) |
|------------|--|-------------|
| Türkiye    | 953.300  | 72,8        |
| ABD        | 80.000   | 6,1         |
| Rusya      | 100.000  | 7,6         |
| Çin        | 47.000   | 3,6         |
| Arjantin   | 9.000  | 0,7         |
| Bolivya    | 19.000   | 1,5         |
| Şili       | 41.000   | 3,1         |
| Peru       | 22.000   | 1,7         |
| Kazakistan | 15.000   | 1,1         |
| Sırbistan  | 24.000   | 1,8         |
| TOPLAM     | 1.310.300  | 100         |

**Çizelge 3.3.** 2014 yılı dünya bor üretim kapasiteleri

| Ülkeler                                       | Kurulu kapasite (bin ton B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Dağılım (%) |
|---|--|-------------|
| Avrupa (Türkiye)                              | 1.086  | 47,2        |
| Kuzey Amerika (ABD)                           | 645  | 26          |
| Güney Amerika (Arjantin, Şili, Peru, Bolivya) | 396  | 13,4        |
| Asya (Rusya, Çin, Hindistan)                  | 460  | 13,2        |
| TOPLAM  | 2.587  | 100         |

Türkiye’de bilinen bor rezervleri, Eskişehir’de Kırka, Balıkesir’de Bigadiç, Bursa’da Kestelek ve Kütahya’da Emet ilçelerinde bulunmaktadır. Türkiye’de en çok rezervi bulunan bor mineralli tinkal ve kolemanit iken, tinkal yatakları Kırka’da, kolemanit yatakları ise Emet, Bigadiç ve Kestelek’de bulunmaktadır. Ülkemizde bor madenlerinin üretilmesi, işletilmesi ve pazarlanması Eti Maden İşletmeleri’ne aittir. Eti Maden İşletmeleri’nin mineral bazında ülkemizdeki rezerv miktarları Çizelge 3.4’te gösterilmiştir (Bor Sektör Raporu, 2014). Bor kimyasalları ve eşdeğeri ürünler ağırlıklı olarak Kırka’da üretilmektedir.

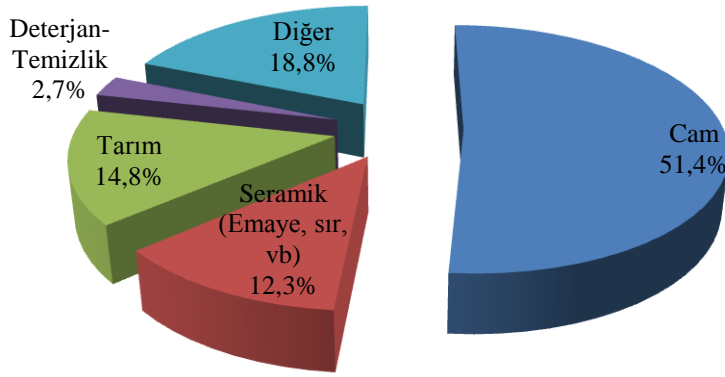
**Çizelge 3.4.** 2014 yılı Eti Maden İşletmeleri rezerv miktarları

| Havza Adı | Bor mineralleri   | Miktar (ton)  |
|-----------|-------------------|---------------|
| Emet      | Kolemanit-Üleksit | 1.815.291.000 |
| Kırka     | Tinkal            | 832.676.000   |
| Bigadiç   | Kolemanit-Üleksit | 631.865.000   |
| Kestelek  | Kolemanit         | 5.255.000     |
| TOPLAM    |                   | 3.285.087.000 |

Türkiye’nin iç piyasasındaki bor ürünleri talebinin tamamını Eti Maden İşletmeleri karşılamakta olduğundan, bor ürünleri ithalatı yapılmamaktadır. Bunun yanı sıra, dünya bor talebinin %47’si Eti Maden İşletmeleri tarafından karşılanmakta olup, 2014 yılında işletmenin toplam satış geliri olan 899.000.000 \$’ın %97’si ihracat kaynaklıdır. Bu ihracatın %57’si Asya, %24’ü Avrupa, %17’si ABD ve %2’si Afrika ve Orta Doğu bölgelerine gerçekleştirilmiştir.

Sanayide bor, bor kimyasalları olarak tüketilebildiği gibi konsantre bor olarak doğrudan da tüketilebilmektedir. Tüketilen bor ürünlerinin %51’i cam (izolasyon tipi cam elyafı, borosilikat cam), %15’i tarım, %12’si seramik-frit, %3’ü deterjan-temizlik sektörlerinde kullanılmaktadır (Şekil 3.1). Geri kalan %19’luk pay ise elektronik ve iletişim sektörü, uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalürji ve inşaat sektörleri arasında paylaşılmaktadır (Bor Sektör Raporu, 2014).





**Şekil 3.1.** Bor tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı

Bor tüketiminde en çok paya sahip olan kullanım alanları, cam, tarım ve seramik endüstrileridir. Boratlar cam yapımında alkalilerin sınırlı miktarda eklendiği uygulamalarda proses sıcaklığını düşürmede eritici olarak kullanılmaktadır. Bor ürünlerinde üretilen borosilikat cam, güneş enerji sistemleri uygulamaları, laboratuvar malzemeleri ve LCD (liquid crystal display-sıvı kristal görünüm) ekranlar için TFT (thin film transistor-iletken ince film) camı üretiminde kullanılmaktadır. Cam elyafı, bor ürünleri içinde en büyük pazara sahiptir. Bor ürünleri, cam elyafı üretimi sırasında cam hammaddelerinin erime noktasını düşürücü ve güçlü bir eritici olarak kullanılmaktadır. Optimum elyaflaştırmanın sağlanması için ısı, viskozite ve yüzey gerilimini kontrol eden bir unsurdur. Bor ürünleri, üretilen elyafın dayanıklı, biyoçözünür, su ve kimyasal etkilere dirençli olmasını sağlamaktadır.

Bor ürünleri tarım ve ormancılık alanlarında temel olarak gübre (mikrobesleyici), herbisit (yabani bitki kontrolü), pestisit (haşere kontrolü) ve ahşap koruma amacı ile kullanılmaktadır. Bor, bitkiler için toprakta bulunması gerekli bir elementtir; bitkilerin büyüme, gelişme ve ürün veriminde önemli rol oynamaktadır. Gübrede kullanılan borlar, bor kimyasalları formunda olup; boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, disodyum oktaborat tetrahidrat, sodyum pentaborat ve borik asittir.

Seramik endüstrisi ise bor ürünleri için en eski pazar olarak bilinmektedir. Borlar seramik sektöründe temel olarak seramik sırları ve porselen emaylarında

kullanılmaktadır. Az miktarda seramik karo gövde kompozisyonlarında da kullanım alanı bulmaktadır. Sır ve emaylarda bor kullanılmasının en önemli sebepleri, erimenin erken safhalarında cam oluşumunu engellemek, renk verici maddelerin çözünmesine zemin hazırlamak ve pişirme zamanını azaltmak, camın viskozitesini ve yüzey gerilimini azaltarak sır veya emayın hızlı bir şekilde oluşmasını ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmasını sağlamak, kaplamanın termal genişleme katsayısını düşürerek sır veya emayın kapladığı yüzeye iyi yapışmasını sağlamak, son ürünün parlaklık ve sır görünümünü iyileştirmek ve son ürünün mekanik dayanımı ve çizilmeye karşı direncini artırmaktır. Bu amaçla kullanılan bor ürünleri, kolemanit, üleksit, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, borik asit ve susuz borakstır (Bor Sektör Raporu, 2014).

### **3.1. Bor Bileşiklerinin Üretimi ve Üretimden Kaynaklanan Atıklar**

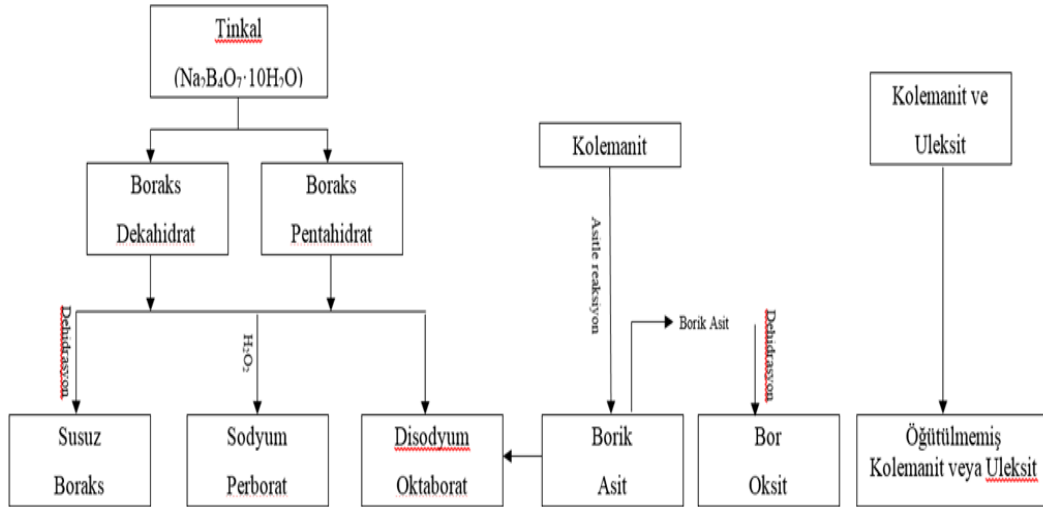
Bor minerallerinin üretim yöntemleri, minerallerin doğada masif olarak (karada) veya çözelti olarak (suda) bulunma durumuna ve cevherin bulunduğu derinlik ve fiziksel yapısına bağlı olarak değişmektedir. Mevcut olan üç üretim yöntemi, açık ocak yöntemi, kapalı ocak yöntemi ve çözelti madenciliği yöntemleridir. Açık ocak yöntemi, cevherin üzerinde bulunan örtü tabakasının delme veya patlatma işlemi ile gevşetilip alındıktan sonra cevherin çıkarılmasını kapsar. Yerküreye en yakın tabakalarda oluşan bor mineralleri, bu yöntem ile çıkarılır. Kapalı ocak yöntemi, cevherin üzerindeki örtü tabakasının kırılarak çıkarılmasının zor olduğu durumlarda örtü tabakasının delinip tüneller açılarak cevherin alınması yöntemidir. Çözelti madenciliği yönteminde ise bor mineralleri su yatağına %5'lik hidroklorik asit ve kireç eklenerek kolemanit üretilmesi şeklindedir. Türkiye'de açık ve kapalı ocak yöntemlerinin her ikisi de kullanılmaktadır (Demir, 2006).

Eti Maden 2006 yılında 613.984 ton  $B_2O_3$  ürün üretimi ile dünya bor üretiminin %36,5'ini, 630.094 ton  $B_2O_3$  ürün satışı ile de dünya bor talebinin %37,1'ini oluşturmuştur. Eti Maden, 2010 yılında bor kimyasalları ve eşdeğeri ürün üretiminde 2000 yılına göre %220 artışla 1,4 milyon ton bor kimyasalları ve eşdeğeri ürün üretim değerine ulaşmıştır (Bor Sektör Raporu, 2010).

Maden ocaklarından çıkarılan bor minerallerinin büyük kısmı işlenerek boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks ve borik asit gibi daha değerli rafine bor bileşiklerine dönüştürülmektedir. Ticari bor mineralleri konsantreleri ve bileşiklerinin üretim yöntemleri Çizelge 3.5 (Kalafatoğlu ve Örs, 2003) ve Şekil 3.2’de verilmiştir (Bor Sektör Raporu, 2014).

Çizelge 3.5. Ticari bor mineral konsantreleri ve bileşiklerinin üretim yöntemleri

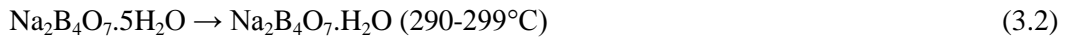
| Konsantre/ bileşik | Üretim yönteminde yer alan birim işlemler  |
|--------------------|--|
| Konsantre mineral  | Kırma, öğütme, yıkama, sınıflandırma   |
| Kristal borakslar  | Çözme, süzme, kristalizasyon, kurutma  |
| Susuz boraks       | Ergitme, akışkan yatakta dehidrasyon   |
| Borik asit         | Reaksiyon, kristalizasyon, kurutma<br>i) Kolomonit/tinkal+mineral asit<br>ii) Çözeltiden ekstraksiyon<br>iii) Borat çözeltilerinin elektrolizi |
| Bor oksit          | Borik asit dehidrasyonu  |
| Metal boratlar     | borik asit/bor oksit/boratlar+metal hidroksit  |
| Fluoboratlar       | borik asit+HF+metal hidroksit  |



Şekil 3.2. Bor kimyasalları ve eşdeğeri ürün üretimi

Bor cevherlerinden boraks, genel olarak kristallendirme yöntemi ile elde edilmektedir. Boraks, genellikle doğada Tinkal ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ve Tinkalkonit ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) şeklinde bulunmaktadır. Türkiye’de boraks üretimi tinkal’den yapılmaktadır. Yaklaşık 10 mm boyutundaki konsantre tinkal, su ile birlikte reaktöre beslenir ve yaklaşık  $100^\circ\text{C}$ ’da çözünme sağlanır. Tinkalde

bulunan kil koloidal halde olduğundan, uygun bir çöktürücü ile çöktürülerek çözeltiden ayrılır. Bu çökelek şlam olarak adlandırılmaktadır. Boraks çözeltisi ise bir filtrepresten geçirilerek, kristalizatöre verilir. 40°C’da kristallendirilen boraks, bir santrifüje verilerek %5 nem ihtiva edecek şekilde alınır. Daha sonra 60°C’da kurutularak depolanır. Boraksların ticari açıdan en önemlileri, sodyum tetraborat dekahidrat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), boraks pentahidrat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ve susuz boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )’tır. Doğada tinkal minerali olarak bulunan boraks dekahidrat 50°C’da ısıtıldığında boraks pentahidrat vermektedir. Boraks pentahidrat 160–170°C’da boraks dihidrata (denk. 3.1), 290–299°C’da boraks mono hidrata (denk. 3.2) ve 400–450°C’da da susuz boraksa (denk. 3.3) dönüşür (Alma ve Acemioğlu, 2001).



### 3.1.1. Kırka Bor İşletmesi ve Atıkları

Eskişehir Kırka Bor İşletmesi genel olarak çözme, kristallendirme, kurutma ve ergitme olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

**Çözme** bölümünde, tinkal konsantresi, buharla ısıtılan ve içinde karıştırıcı bulunan 98°C sıcaklıktaki çözme tankına beslenip; sirkülasyon sağlanır ve çözelti su ile karıştırılarak çözülür. Tinkal konsantresinde çözünmeyen safsızlıkların flokülasyon çözeltisi dairevi yoğunlaştırıcıya beslendikten sonra boraks çözeltisi tikner taşkanı olarak alınır, filtre edilir, kristalizatöre beslemek üzere depolanır. Tikner alt çıkışı ise, ikinci bir flokülasyon işlemine tabi tutulduktan sonra atık göletine aktarılmaktadır.

**Kristallendirme** bölümünde, besleme tankından alınan çözelti 66°C sıcaklıkta, vakumla çalışan,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  kristallerinin elde edileceği penta kristalizatörüne gönderilmektedir. Kristaller bir tanka alındıktan sonra burada hidrosiklon ve santrifüjde, kristaller ve çözeltinin ayrılması sağlanmaktadır. Çıkan çözelti  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  kristallerinin elde edilmesi için 46 °C sıcaklıkta

çalıştırılan deka kristalizatörüne aktarılır; bu kristalizatörden elde edilen kristaller de yine bir tanka alınarak hidrosiklon ve santrifüjde çözültiden ayrılır. Ana çözelti, beslenen tinkal konsantrisini çözmek için tekrar çözme tankına gönderilirken, pentahidrat ve dekahidrat kristalleri ise kurutma ve ergitme bölümüne gönderilmektedir.

**Kurutma ve ergitme** bölümünde, boraks dekahidrat kristallerinden bir kısmı önce döner kurutucuda kurutulup, elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki kristaller mamul rafine boraks dekahidrat olarak depolamaya gönderilmektedir. Elek üstü, elek altı ve geri kalan ile, bir direkt döner kurutucuda kurutulan dekahidrat kristalleri, ikinci döner kavurucuda kalsine edilerek 2.5 mol su ihtiva eden boraks elde edilir. Kalsine edilmiş bu boraks, ham boraks pentahidratın elek üstü ve elek altı ile birlikte, ham susuz boraks elde etmek için suyu uçurulmak üzere, ham boraks fırınına gönderilir.

Ham boraks pentahidrat üretiminde kullanılmak üzere, pentahidrat kristalizatöründe elde edilen boraks pentahidrat kristalleri, döner kurutucuda kurutulur, istenen tane büyüklüğüne göre ayrılmak için elekten geçirilir. Elek altı ve elek üstü parçacıklar 2.5 mol su ihtiva eden boraks ile beraber, ham susuz boraks elde etmek üzere ham boraks fırınına gönderilir. Fırından ergimiş halde çıkan boraks, içten soğutmalı merdanelerde soğutulularak levha haline getirilir, daha sonra levha kırıcı ve çekiç kullanılarak kırıcıda kırılır. Son aşamada ise kırılmış haldeki boraks, elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki ürün depolamaya gönderilir (Kula, 2000).

Türkiye’de bor mineralleri üretimi sonucunda her yıl 600.000 ton atık oluşmakta ve bu atıkların %67’lik kısmı Eti Maden Kırka Bor İşletmesi’ndeki ocaklar, konsantratör ve bor türevleri tesisinde meydana gelmektedir (Demir ve Orhan, 2002).

Kırka Bor İşletmesi’nde 6 adet atık barajı (Şekil 3.3) mevcut olup, 892.440 ton/yıl olan boraks pentahidrat üretimi kapasitesi sonucunda oluşan 1.000.000 m<sup>3</sup> miktarındaki atıktan dolayı 2013 yılında yeni bir atık barajına ihtiyaç duyulmuştur. Mevcut 6 atık göletinin toplam 16.980.000 m<sup>3</sup> atık hacmi bulunmaktadır. Mevcut göletlerin yükseltme çalışmaları devam etmekte olup, yükseltmeyle beraber, 1 no’lu gölette 1.236.000 m<sup>3</sup>, 2 no’lu gölette 1.157.100 m<sup>3</sup>,

3 no'lu gölette 1.331.525 m<sup>3</sup> ve 6 no'lu gölette 1.235.850 m<sup>3</sup> olmak üzere toplamda 4.960.475 m<sup>3</sup> ek hacim sağlanacaktır (http-4).



**Şekil 3.3.** Kırka Bor İşletmesi atık göleti

Etibor Kırka Boraks İşletmesi'nde birincisi konsantratör şlam, ikincisi ise konsantratör kil pestili atığı olmak üzere iki tip konsantratör atığı oluşmaktadır. Konsantre bor üretimi, yıkama işlemi sonunda dağıtma ve sınıflandırma sonucunda killi malzemenin uzaklaştırması esasına dayanmaktadır. Bu nedenle konsantratör tesisi katı atığının çoğunluğu kil boyutundaki minerallerden oluşturmakta, ortalama %13-15 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir (Kurttepelı, 2006).

Cevher zenginleştirme tesislerinden çıkan atıklar genellikle ince boyutlu katı veya pulp halindedir. Bu atıklar önceleri maden alanlarının yakınındaki sahalara, artık barajlarına, denizlere, göllere veya nehirlere boşaltılmakta iken günümüzde zenginleştirme tesis atıklarından yararlanma veya eğer bu mümkün değilse, en uygun biçimde bertaraf etme yoluna gidilmektedir (Bentli ve ark., 2002). Kil pestilinin herhangi bir şekilde değerlendirilmemesi durumunda çevre sorunlarına yol açtığı da bilinmektedir.

Her iki atık türünün bileşiminde yüksek sayılabilecek oranda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunurken, MgO, CaO ve SiO<sub>2</sub> ile birlikte eser miktarda da SrO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

mevcuttur. Kırka Boraks maden işletmelerinde oluşan kil içerikli atıkların büyük boyutlara ulaşması (yaklaşık 400.000 ton/yıl) halen önemli bir sorun olarak gündemdedir (Çırak, 2010).

Bu tez çalışması kapsamında atık temin edilen Eskişehir Kırka Bor İşletmesi'nde bulunan ocaklardan, konsantratör ve bor türevleri tesislerinden çıkan 400.000 ton atığın 250.000 ton/yılı konsantratör, 150.000 ton/yılı da bor türevleri ünitelerinden oluşmaktadır. Halen 6 adet atık barajı mevcut olan tesiste, kapasiteden dolayı her 4 yılda bir yeni bir atık barajına ihtiyaç duyulmaktadır. İşletme ömrünün en az 250 yıl olduğu dikkate alındığında, tüm bölge atık barajı için kullanılsa da yeterli olamayacağı için, atıkların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

## 4. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Yapılan detaylı literatür taraması sonucunda, bor işletmelerinden kaynaklanan atıkların seramik, emaye, çimento, tuğla sektörlerinde kullanımıyla ilgili pek çok çalışmaya rastlandığı halde, bu atıkların düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz tabaka/geosentetik bariyer olarak kullanımına ilişkin hiçbir çalışma bulunamamıştır. Bu nedenle, konuyla ilgili olan çalışmalar tezin kapsamı doğrultusunda üç bölüme ayrılmış ve önce atık kilin farklı sektörlerde değerlendirilmesiyle ilgili çalışmalar, daha sonra da tezde kullanılan malzemeler ve DDT'lerde kullanılan geçirimsiz tabakalar ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

### 4.1. Bor Atık Kili ile İlgili Çalışmalar

Bor atık kilinin çimento üretiminde, tuğla yapımında, seramik üretiminde kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

**Kula (2000)** tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında, tinal konsantratör atıkları, kolemanit konsantratör atıkları, uçucu kül ve taban külleri belirli oranlarda çimento ile karıştırılmış, karışımın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ve Türk Standartları ile karşılaştırıldığında uygun olduğu belirlenmiştir.

**Boncukçuoğlu ve ark. (2002)**, bor atıklarını portland çimentosu üretiminde değerlendirmek üzere bir çalışma yürütmüşlerdir. Bandırma'da bulunan borik asit fabrikasının atıkları, cüruf, çimento ve kum ile karıştırılarak basınç mukavemeti ve diğer mekanik özellikleri test edilmiş; bor türevleri tesisi atığı kullanılan çimentonun, geleneksel çimentodan daha yüksek mekanik dayanıma sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Atık miktarının daha fazla artırılmasıyla mekanik dayanımın düştüğü gözlemlendiği için, çimentoya eklenmesi gereken en uygun atık miktarının ağırlıkça % 25 olduğu belirtilmiştir.

**Demir ve Orhan (2002)**, bor tesisleri atığını yapı bloğu malzemesi olarak değerlendirmek amacıyla, atığı pomza kumu ile belirli oranlarda karıştırarak öncelikle optimum karışım oranı ve pişirme sıcaklığını belirlemişlerdir. Pişmiş örnekler üzerinde basınç dayanımı, su emme, donma dayanımı, birim hacim



ağırlığı, porozite deneyleri uygulayarak; pomza kumunun bor atığı ile ağırlıkça % 50 oranında karıştırılıp 900°C’de pişirildiğinde, porozitesi yüksek, birim hacim ağırlığı düşük bir malzeme elde edilebileceğini göstermişlerdir.

**Ediz ve Yurdakul (2002)** tarafından yapılan çalışmada, atık kilin duvar karosu bünyesinde kullanılması amacıyla kil, kaolen, silt kumu, dolomit ve pengamit kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda pengamit yerine alternatif akışkanlaştırıcı olarak maksimum % 10 konsantre atık veya % 5 türev atığı kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Karasu ve ark. (2002)**, Kırka Boraks Fabrikası konsantre ve türev atıklarının, duvar karosu bünye özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, atığın alternatif akışkanlaştırıcı olarak kullanım potansiyelini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, konsantre atığın duvar karosu bünyesinde pegmatitin yerine alternatif akışkanlaştırıcı olarak maksimum % 10, türev atığının ise % 5 oranında kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

**Kavas ve Önce (2002)** tarafından yapılan çalışmada, konsantratör ve bor türevleri atık killeri belirli oranlarda tuğla malzemeleri ile karıştırılmış, bu karışımlar üzerinde pişme rengi, pürüzsüzlük, su emme, küçülme, kırılma yükü ve kireç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda atık killerin tuğla yapımında kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Böylece atık killerin tuğla yapımında kullanılması, işletmeye ekonomik avantaj sağlarken, killerin çevreye olan etkilerinin de azaltılacağı sonucuna varılmıştır.

**Targan ve ark. (2002)** tarafından yapılan çalışmada, Emet Etibor fabrikasından temin edilen kolemanit atıklarının, çimento üretiminde değerlendirilme potansiyeli incelenmiştir. Atığın yanı sıra kula cürufu ve bentonit de katılan numunelerin çimento priz süresi, hacim genişmesi, eğme dayanımı ve basınç dayanımı özellikleri test edilmiştir. Çalışmanın sonunda, kula cürufu ve kolemanit konsantratör atığı karışımları ile bentonit ve kolemanit konsantratör atığı karışımlarının çimento katkı maddesi olarak değerlendirilebilir olduğu ve bu şekilde klinker üretiminde enerji tasarrufu sağlanabileceği sonuçlarına varılmıştır.

**Emrulloğlu ve Emrulloğlu (2004)** tarafından yapılan çalışmada, kil atıklarının yer karosu bünyesinde kullanımının araştırılması için örneklerde kimyasal analiz ve XRD analizi yapılmıştır. Ayrıca plastik şekillendirme ve kum

presleme teknikleri kullanılmış ve bu araştırmaların sonucunda atık killerin kullanılması ile kaliteli yer karosu üretilebileceği görölmüştür.

**Uslu ve Arol (2004)**, bor atığının kırmızı tuğla yapımında kullanılması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Tuğla kiline % 0, 10, 20, 30, 40 ve 100 oranında atık kil katıldıktan sonra karışımın su muhtevası % 20'ye getirilerek farklı sıcaklıklarda pişirilmiştir. Numunelerde basınç dayanımı, su emiciliği, donma dayanımı ve kireç testleri gerçekteştirilmiştir. Tuğla yapımı sırasında karışıma % 30'a kadar atık kil eklenmesinin basınç dayanımı, su emiciliği ve yoğunluğu artırdığı ve böylece tuğla kalitesini yükselttiği belirlenmiştir.

**Olgun ve ark. (2005)**, seramik duvar karosu yapımında boraks atığı ve uçucu kül kullanımını araştırmışlardır. Numunelerde pişme mukavemeti, pişirmedeki kayıp, su emiciliği ve mikroyapı analizleri gerçekteştirilmiştir. Çalışmada, fayans içeriğindeki potasyum feldispat yerine % 2-10 aralığındaki farklı oranlarda atık kil ve uçucu kül kullanılmıştır. Atık kilin oranı % 6'ya kadar artırıldığında, pişme mukavemetinin de arttığı belirlenmiştir. Atık kil miktarı artırıldığıkça, pişmedeki kayıp artmış, ürünün su emiciliği azalmıştır. % 10'a kadar uçucu kül ve % 5'e kadar atık kil kullanıldığında, normal fayansa kıyasla mineralojik ve reolojik özellikler açısından daha iyi bir ürün elde edilmektedir.

**Kurama ve ark. (2007)**, boraks atığının duvar karosu yapımında sodyum feldispat yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Karışımlar % 0,5, 1, 1,5 ve 2 oranlarında atık kullanılarak preslenmiş, 30 dakika boyunca 1170°C'lik fırınlama sıcaklığı ile pişirilmiştir. Kiremit yapımında atık kullanılmasının camlaşmayı artırdığı ve bu sayede pişirme yönteminde teknolojik açıdan gelişme kaydedilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

**Akbulut (2009)** tarafından yapılan yüksek lisans tezi kapsamında, üçüncü bileşen şartlarında bor atık katkılı çimentonun özelliklerinin incelenmesi amacıyla, ağırlıkça % 0-1-3-5 oranlarında atık kil ile 4 farklı çimento karışımı elde edilmiş ve %3 katkılı karışımın en iyi mukavemete sahip olduğu gösterilmiştir. Daha sonra bu karışımlara % 0,1-0,3-0,5-0,7 oranında organik katkı (pektin) ilave edilerek hidrasyon özelliklerini iyileştirme çalışmaları yapılmış, fakat organik katkının mukavemeti düşürdüğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda,

Türk Standartları ile karşılaştırıldığında % 3'lük atık kil ve % 0,1'lik organik katkı atığı karışımının uygun olduğu görülmüştür.

**Batar ve ark. (2009)** tarafından yapılan çalışmada, katkı malzemesi olarak % 0-5 perlit, % 0-2,5 atık kağıt, % 0-5 kalsine tinkal (boraks) ve % 3,5-17,7 atık kalsine tinkal kullanılarak sıva malzemesi üretilmiştir. Üretilen malzemelerde mukavemet ve ısı geçirgenlik direnç deneyleri yürütülerek sonuçlar, mevcut sıva malzemeleri ile karşılaştırılmıştır. En iyi karışım oranları % 3 perlit, % 1,5 atık kağıt, % 7,1 atık kalsine tinkal olarak bulunmuştur. Bu karışım oranlarına sahip olan malzemenin ticari ürüne göre ısı geçirgenlik direnci % 26, mukavemet değeri ise % 31 oranında artmıştır.

**Uğurlu (2009)** tarafından yapılan çalışmada, atık killerin, uçucu kül ve volkanik tüflerin çimento üretimine katkısı araştırılmıştır. Farklı oranlarda uçucu kül, volkanif tüf ve atık kil karışımı ile oluşturulan çimento üzerine deneyler yapılmış ve Türk Standartları ile karşılaştırıldığında, kil atıklarının çimento içerisinde % 10-15 oranında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

#### **4.2. Bitüm, Atık Lastik ve Geomembran ile İlgili Çalışmalar**

**Arand (2001)** tarafından yapılan çalışmada, katı atık depolama sahası tabanında geçirimsiz tabaka olarak asfalt betonunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, bitümün hidrolik geçirimsizliği sağladığı kadar, taşınımlı ve difüzyif yöntemlerle sızan çözünen maddeler ile aşınmaya karşı dirençli olduğu da belirlenmiştir. Çalışma sonucunda bitüm katmanı kalınlığının iki katına çıkarılarak, çözücü geçişinin beş kat daha geç başlamasının sağlanacağı bulgusuna varılmıştır.

**Ouyang ve ark. (2005)** tarafından yapılan çalışmada, karıştırma tekniği ile stiren-bütadien-stiren kopolimeri (SBS) ve kaolin kili (KC) bileşikleri hazırlanmıştır. Bu bileşikler, bitümün yüksek sıcaklıktaki depolama kararlılığının iyileştirilmesi için kullanılmış ve sadece SBS modifiyeli bitüm ile karşılaştırıldığında başarılı sonuç alındığı görülmüştür. SBS/KC oranının 3 olduğu durumda modifiye bitümün yüksek sıcaklıkta oldukça kararlı olduğu saptanmıştır. Yüksek sıcaklıktaki depolama kararlılığında iyileşme, SBS ve bitüm yoğunlukları

arasındaki farkı azaltması nedeniyle SBS/KC karışımlarındaki KC ile ilişkilendirilmiştir. Modifiye edilmiş bitümde KC oranı maksimum % 2 olarak kullanılmış, bu KC içeriğinin modifiye edilmiş bitümün mekanik özellikleri üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmüştür.

**Cao (2007)** tarafından yapılan çalışmada, atık lastik kirliliğinin minimize edilmesi ve bitüm karışımlarının özelliklerinin iyileştirilmesi için kuru yöntemle geri dönüştürülmüş atık lastik modifiyeli bitüm karışımları hazırlanmıştır. Toplam karışımın ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3'ü oranında lastik içeren bitüm karışımları ve lastik içermeyen kontrol bitüm karışımı ile testler yapılmış ve bu testlerin sonucunda kuru yöntem kullanılarak geri dönüştürülen lastiklerin bitüm karışımlarına eklenmesinin bitüm karışımlarının yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona ve düşük sıcaklıkta kırılmaya karşı direnç özelliklerini iyileştirebileceği görülmüştür.

**Karacasu ve Bilgiç (2009)** tarafından yapılan çalışmada, sıcak bitüm karışımlarında atık lastik kullanılabilirliği incelenmiştir. Hazırlanan karışımlarda atık lastik oranı % 2, 4 ve 6 olarak belirlenmiş, numuneler üzerinde Marshall deneyleri ve sünme deneyi yapılmıştır. Üç farklı boyutta atık lastik (sert plastik, çubuk lastik ve lastik tozu) ve iki farklı penetrasyonda bitüm (50/70 ve 70/100) ile çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma sonucunda atık lastik oranı arttıkça, özgül ağırlığın, bitümle dolu boşluk oranının, Marshall dayanımının azaldığı; boşluk oranının ve akma miktarının arttığı belirlenmiştir.

**Barraza ve ark. (2010)** tarafından yapılan çalışmada, iki bitümlü karışım katmanı arasına yerleştirilen geosentetik malzeme ile aralarındaki yapışmanın ölçülmesi için yeni bir metot geliştirilmiştir. Metotta, karışımdaki bağlayıcı tipi ve içeriği ile, kullanılan geosentetik malzemenin tipolojisinin yapışma üzerindeki etkisi incelenebilmektedir. Çalışma sonucunda geosentetikler içinde en iyi yapışma özelliği gösteren malzemenin geogridler, en yüksek sürtünme mukavemetine sahip olan malzemenin polyester ağ ve optimum bağlayıcı miktarının  $0,3 \text{ kg/m}^2$  olduğu yargılarına ulaşılmıştır.

**Correia ve Bueno (2011)**, bitüm kaplamasının örgüsüz geotekstillerin çekme dayanımı ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Polyester ve polipropilen türü geotekstillere, bitüm

ile kaplanarak çekme dayanımı ve su buharı geçirgenliği testlerine tabi tutulmuşlardır. Çalışmanın sonucunda geotekstil içerisindeki fiberlerin bitüm ile bağlanması nedeniyle çekme dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Aynı zamanda bitüm oranı arttıkça, geçirimsizliğin de arttığı görülmektedir; üretilen malzeme çok düşük geçirimsizliğe sahip olan bir bariyer davranışı sergilemiştir.

**Bannour ve ark. (2013)**, geosentetik kil bariyer (GCL) ile deforme edilerek kusurlu hale getirilmiş bir bitümlü geomembranı (BGM) biraraya getirerek, kompozit bir geçirimsiz örtü malzemesi oluşturmuşlar ve malzemedeki akış hızı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada sodyum bentonit ile hazırlanmış bir GCL, kalsiyum bentonit ile hazırlanmış bir GCL ve taşıyıcı olarak cam elyaf keçe içeren bir bitümlü geomembran kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar başlatıldıktan sonraki 300 saat boyunca akış hızı giderek düşmüş, 300. saatten sonra değişmemiştir. En iyi sonuç alınan numune sodyum bentonit ile oluşturulan GCL olup, hidrolik iletkenlik değeri  $1,77 \times 10^{-11}$  olarak belirlenmiştir.

**Mazzieri ve ark. (2013)** tarafından yapılan çalışmada, geosentetik kil tabakası (C GCL) ile ön ıslatma işleminden sonra sıkıştırılmış geosentetik kil tabakasının (DPH GCL) önce saf su geçirimi, daha sonra pH'ı 2.0 olan 25'er mM'lık Pb, Zn ve Cu çözeltileri karıştırılarak oluşturulmuş sentetik sızıntı suyunun geçirimi incelenmiştir. ASTM D 5084 standardına göre yapılan geçirimsizlik testleri sonucunda, hidrolik iletkenlik katsayısı (k), C GCL için saf suda  $1.5 \times 10^{-11}$  m/s ve sentetik sızıntı suyunda  $1.6 \times 10^{-10}$  m/s; DPH GCL için saf suda  $3.4 \times 10^{-12}$  m/s ve sentetik sızıntı suyunda  $3.3 \times 10^{-11}$  m/s olarak belirlenmiştir.

**Melotti ve ark. (2013)**, bitümlü karışımlarda kalsit yerine dolgu malzemesi olarak biyokütlenin yakılmasıyla oluşan küllerin kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Farklı 21 külün ve kalsitin fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek miktarda kalsiyum bileşikleri içeren dolgu malzemelerinin, bitümle daha güçlü etkileşime sahip olduğu, biyokütle kaynaklı küllerin kurutulup öğütülmek şartıyla, bitümlü karışımlarda filler olarak kullanılabileceği bulgusuna varılmıştır.

**Sangiorgi ve ark. (2014)**, sıcak bitümlü karışımlarda filler olarak, gıda sektöründe oluşan ağartma işlemi atığı bentonit kilinin kullanımını

araştırmışlardır. Hazırlanan karışımlarda çekme dayanımı, sertlik modülü ve kalıcı deformasyona karşı direnç analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı analizler sektörde kullanıldığı gibi, kalsit dolgu malzemesi ile hazırlanan karışıma uygulanmış ve bu malzeme, kontrol numunesi kabul edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kalsit yerine atık bentonit kullanımının, bitümlü karışımların işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemediği, çekme dayanımını artırdığı, kalıcı deformasyona karşı direncini ise öğütülmüş (anaerobik ortamda, biyogaz üretim reaktöründe öğütme işleminden geçmiş) atık bentonit iyileştirirken, atık bentonitin saf halinin olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bu bulgular ışığında atık kilin öğütüldükten sonra sıcak bitümlü karışımlarda kalsitin yerine geçebileceği sonucuna varılmıştır.

**Fallah ve Khodaii (2015)** tarafından yapılan bir çalışmada ise yukarıdan aşağıya sırasıyla bitüm (3 farklı kalınlık: 50, 70 ve 90 mm), geogrid (cam elyaf örgü, polyester), modifiye (SBS, CRS) bağlayıcı, bitüm betonu ve elastik alt tabakadan oluşan çok katmanlı bir yol kaplama yapısı üzerinde, elastik modül, çekme dayanımı ve gerilme testleri yapılmıştır. Cam elyaf örgünün polyestere göre gerilme dayanımının daha yüksek olduğu, geogridin çekme dayanımı arttıkça, çatlama gösteren katmanın elastik modülünün, dolayısıyla, ilk gerilme kuvvetinin de arttığı görülmüştür.

**Xue ve ark. (2013)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE geomembran örneğinin 20°C, 50°C ve 80°C sıcaklıkta sızıntı suyunda 5, 10 ve 15 gün süreyle aşındırılması sağlandıktan sonra, çekme ve delinme özellikleri incelenmiştir. Geomembranın sızıntı suyunda aşındırılma işlemi 300 dönüş/dk santrifüj hızında, 20 MPa sabit basınçta, belirlenen süre boyunca uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, aşındırma süresi ve sıcaklık arttıkça, hem çekme dayanımı, hem de delinme dayanımının azaldığı ve aşındırma işlemi ile geomembranın yumuşadığı bulgusu elde edilmiştir.

### **4.3. DDT'lerde Kullanılan Geomembranlar ile İlgili Çalışmalar**

**Koerner ve Koerner (2006)** tarafından yapılan çalışmada, aynı DDT içerisindeki farklı iki hücrede bulunan geomembran tabakaların sıcaklık

karşısındaki davranışları incelenmiştir. Hücrelerden “kuru” olarak adlandırılarda, var olan sıvı miktarı minimize edilmişken, “ıslak” hücrede ise yüksek nem içeriğine sahip atık bulunmakta, bu nedenle sıvı miktarı artmaktadır. Her iki hücre de 10 yıl boyunca izlenmiştir. Kuru hücredeki geomembran tabakanın sıcaklığı, ilk 5.5 yıl boyunca 20°C’de sabit kaldıktan sonra aniden 30°C’ye yükselmiş ve o andan beri çok yavaş bir şekilde artmaya devam etmiştir. Islak hücredeki geomembranın sıcaklığı ise 25°C’den başlamış, çalışmanın ilk 3.7 yılı boyunca 41-46°C aralığına yükselmiştir. Hem kuru hem de ıslak hücrenin üst örtüsünün sıcaklığının ise kış aylarında 0°C, yaz aylarında 30°C olduğu belirlenmiştir.

**Needham ve ark. (2006)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE geomembranların kullanım ömrü araştırılmıştır. Geomembranların kullanım ömrü, zamanla yapısında oluşan deliklerle bağıntılı olduğu için, kullanım ömrü boyunca delik oluşumunun altı evrede gerçekleştiği varsayımı üzerine bir kavramsal model kurulmuş; HDPE geomembranın bozunması ise bir geçirimsiz tabakanın maruz kalacağı kuvvetler göz önüne alınarak kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, uzun süreli baskı, gerilme ve çatlamalara maruz kalan geomembranda delikler oluşacağı ve geçirimsiz tabakada oksidasyon başladığı andan itibaren çatlama hızının artacağı bulgularına varılmıştır.

**Nefso ve Burns (2007)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE, PP ve PVC geomembranların, yeraltı sularında kirletici olarak sıklıkla karşılaşılan trikloroetilen, metil tersiyer-bütül-eter, 1,2-diklorobenzen, benzen ve trinitrotoluen organik bileşiklerini emme ve tutma özellikleri araştırılmıştır. HDPE geomembranın 1,2-diklorobenzen kirleticisine maruz bırakılması sonucunda diğer kirletici ve geomembranlara göre oldukça yüksek bir tutma kapasitesi sonucu elde edilmiştir. Bunun dışındaki tüm kirletici/tutucu kombinasyonlarında ise birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiş, PVC geomembran en yüksek, HDPE geomembranın ise en düşük emilim kapasitesine sahip olduğu bulgusuna varılmıştır.

**Chen ve ark. (2011)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE geomembranların düzenli depolama tesislerinde ara örtü olarak kullanımının depo gazı ekstraksiyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir saha çalışması yürütülerek, DDT ara örtüsü olarak kil yerine yalnızca HDPE

geomembran kullanılmış, geomembran parçaları ayrı ayrı serilmek yerine kaynaklandıktan sonra bir bütün halinde serilerek hava geçirmez bir tabaka elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kaynaklanmamış HDPE geomembran serimine göre bu yöntem ile ana gaz borusunda %25 daha fazla gaz akışı sağlandığı, gaz ekstraksiyon kapasitesinin artırıldığı bulgusuna varılmıştır. Bununla birlikte, HDPE geomembranların ısı yalıtım kapasitesinin düşük olması nedeniyle, soğuk havalarda DDT'lerde gaz üretim kapasitesinin düşeceği öngörülmüştür.

**Varank ve ark. (2011)** tarafından yapılan çalışmada, pilot ölçekte dört adet düzenli depolama reaktörüne dört farklı geçirimsiz tabaka sistemi (R1: *Sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm + 10 cm)*, R2: *Geomembran (2 mm HDPE) + sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm + 10 cm)*, R3: *Geomembran (2 mm HDPE) + sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm) + bentonit tabaka (2 cm) + sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm)*, R4: *Geomembran (2 mm HDPE) + sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm) + zeolit tabaka (2 cm) + sıkıştırılmış kil tabakası (10 cm)*) kurulmuş, 540 gün boyunca fenolik bileşikler ve ağır metallerden oluşan bir model sızıntı suyu bu reaktörlerden geçirilerek, sızıntı suyu içeriğindeki bileşiklerin yeraltı sularına karışma oranı hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, düzenli depolama sahalarının taban geçirimsizliğini sağlamak için bentonit ve zeolit kullanımının, organik bileşiklerin yeraltı sularına geçişini % 35-50; inorganik bileşiklerin geçişini ise % 55-100 aralığında düşürdüğü belirlenmiştir.

**Hoor ve Rowe (2012)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE geomembran kullanılarak, DDT tabanlarında bulunan ikincil geomembran tabakalarda termal yalıtım sağlayarak, sıcaklığın düşürülmesinde lastik parçaları kullanımının etkisini araştırmışlardır. Atığın biyobozunması sırasında ortaya çıkan ısı ve DDT'lerde gerçekleşen diğer kimyasal süreçlerin geçirimsiz tabaka sistemini etkilememesi için, birincil ve ikincil geomembran tabakalar arasına toprak yerine lastik parçaları serilmiş, bir başka örnek, toprak kullanılarak hazırlanmış, bir de yalıtımsız bir sistem geliştirilerek tümünde ısı ve kirlenici geçişi analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Lastik parçalarının, genellikle kullanılan topraktan çok daha iyi ısı yalıtımı sağladığı ve bu sayede geomembranın kullanım ömrünü artırdığı belirlenmiştir.



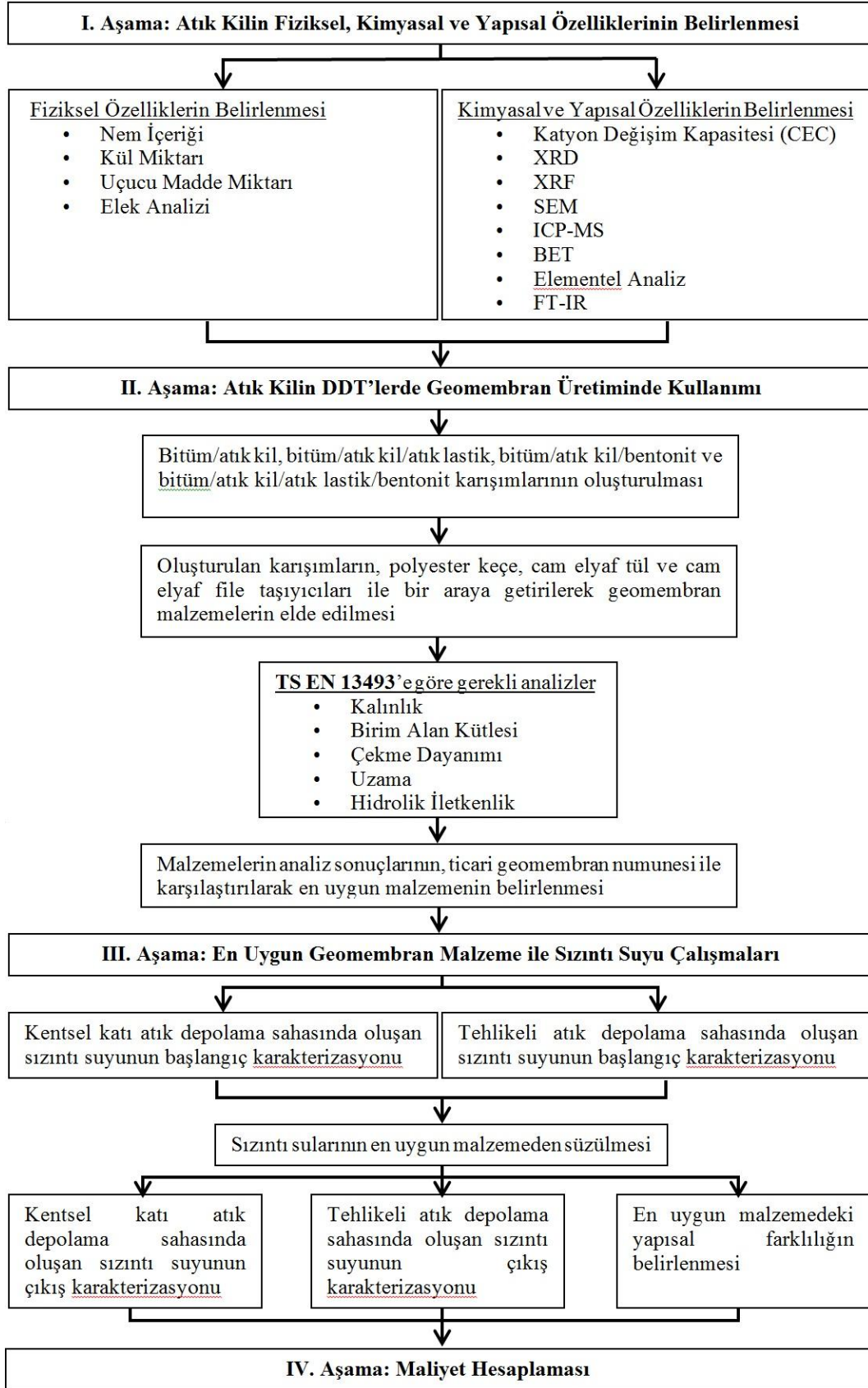
**Abdelaal ve ark. (2014)** tarafından yapılan çalışmada, sızıntı suyu bileşiminin, HDPE geomembranın uzun vadeli performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma için dört farklı sentetik sızıntı suyunda (*L1: Tuz ve uçucu yağ asitleri içeren indirgenmiş sızıntı suyu, L2: İndirgenmemiş sızıntı suyu, L3: Tuz içeren indirgenmiş sızıntı suyu, L4: Uçucu yağ asitleri içeren indirgenmiş sızıntı suyu*) 6.5 yıl boyunca HDPE geomembran yaşlandırılmıştır. L1 ve L3 kodlu sızıntı suyu numunelerinin, geomembranın mekanik özelliklerini (özellikle gerilme-çatlama dayanımını) en çok etkileyen numuneler olduğu; tuz içermeyen sızıntı suyu numunelerine göre çok daha kısa sürede geomembranın deforme olduğu belirlenmiştir.

**Ewais ve Rowe (2014)** tarafından yapılan çalışmada, HDPE geomembranın yaşlanmasının gerilme-çatlama dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. HDPE geomembran, altı farklı sıcaklıktaki (25, 40, 55, 70, 85 ve 95°C) sentetik sızıntı suyunda, hava ortamında ve 55°C sıcaklıktaki suda beş yıl boyunca bekletilmiştir. Geomembranın yapısında kimyasal bozunma başlamadan önce dahi gerilme-çatlama dayanımında değişimler olduğu belirlenmiştir. Bu değişimin sebebinin, yaşlanma süresi boyunca tabakalar arası bağların farklılaşmasıyla oluşan morfolojideki değişim olduğu bulgusuna varılmıştır. Sıcaklık arttıkça gerilme-çatlama dayanımının düştüğü ve malzemenin daha dayanıksız hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

## 5. MATERYAL VE METOD

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen atığın, nem içeriği, kül miktarı, uçucu madde miktarı, sabit karbon miktarı belirlenmiş; elek analizi, katyon değişim kapasitesi (CEC), ICP-MS, XRD, XRF, SEM, FT-IR, BET ve elementel analizleri yapılarak fiziksel, kimyasal ve yapısal özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra tüm DDT türlerinde geomembran olarak kullanılabilcek bir karışım elde etmek amacıyla atık kile farklı katkı maddeleri (bitüm, atık lastik, bentonit) ve farklı taşıyıcılar ilave edilmiş ve farklı karışımlar oluşturulmuştur. Bu karışımlarda, kalınlık, birim alan kütlesi, çekme dayanımı, uzama ve hidrolik iletkenlik analizleri yapılmıştır.

Tüm sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra en uygun karışım belirlenerek, depolama tesislerinde oluşan sızıntı sularının bu malzemeye etkisini görmek amacıyla, mevcut bir kentsel katı atık (KKAB), bir de tehlikeli atık (İZAYDAş) düzenli depolama tesislerinden alınan sızıntı sularıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Tez alışması süresince izlenen iş akış şeması şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İş akış şeması

## 5.1. Atık Kilin Fiziksel, Kimyasal ve Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

Şekil 5.1’de verilmiş olan iş akış şemasının I. Aşama çalışmaları kapsamında, tezde kullanılan bor türevleri tesisi atığının fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla;

- Nem içeriği,
- Kül miktarı,
- Uçucu madde miktarı,
- Sabit karbon miktarı
- Elek analizi,

Atık kilin kimyasal ve yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla;

- Katyon değişim kapasitesi (CEC),
- ICP-MS,
- XRD,
- XRF,
- SEM,
- FT-IR,
- BET,
- Elementel analiz

deneyleri yapılmıştır.

### 5.1.1. Atık kilin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Tezin bu bölümünde, atık kilin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen nem miktarı, kül miktarı, uçucu madde miktarı, sabit karbon miktarı tayinleri ile elek analizinin metodları açıklanmış, bulgular sunulmuş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

**Nem Miktarı Tayini:** ASTM D-3173’e göre yapılan tayinde, örnekten 1 g alınmış, sabit tartıma getirilmiş ve darası alınmış krozeye konularak, sıcaklığı 110°C olan etüvde 1 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan kroze desikatörde soğutulmuş ve tekrar tartılarak, nem miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\text{Nem, \%} = [(A-B)/A] \times 100 \quad (5.1)$$

A: Örneğin ağırlığı (g),

B: Etüvden çıkan örneğin ağırlığı (g).

**Kül Miktarı Tayini:** ASTM D-3174'e göre yapılan tayinde, nem analizinden çıkan kroze ve örnekler, soğuk kül fırınına konulmuş ve sıcaklık 1 saat içerisinde 450-500°C olana kadar dereceli olarak ısıtılmıştır. Isıtmaya, sıcaklık ikinci saatin sonunda 700-750°C olacak şekilde devam edilmiş, sıcaklık 750°C'de iken, 2 saat daha bekletilmiştir. Dördüncü saatin sonunda kül fırınından çıkarılan kroze desikatörde soğutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Kül miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\text{Kül, \%} = [(A-B) / C] \times 100 \quad (5.2)$$

A: Fırından çıkan kroze+kül ağırlığı (g),

B: Boş krozenin ağırlığı (g),

C: Örneğin ağırlığı (g).

**Uçucu Madde Miktarı Tayini:** ASTM D-3175'e göre yapılan tayinde ise örnekten 1 g alınmış, sabit tartıma getirilmiş ve darası alınmış kroze konulmuştur. Kroze, soğuk fırına konulduktan sonra sıcaklık 950°C'ye ayarlanmıştır. Sıcaklık 950°C'ye yükseldikten sonra 7 dakika bekletilmiş ve kroze fırından alınmıştır. Fırından çıkarılan kroze desikatörde soğutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Uçucu madde miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı, \%} = [(A-B) / A] \times 100 \quad (5.3)$$

A: Örneğin ağırlığı (g),

B: Fırından çıkan örneğin ağırlığı (g).

$$\text{Uçucu Madde, \%} = C-D \quad (5.4)$$

C: Ağırlık kaybı, %.

D: Nem, %.

**Sabit Karbon Miktarı Tayini:** Uçucu madde miktarı belirlendikten sonra, sabit karbon miktarı, **ASTM D-3172**'ye göre aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$\text{Sabit Karbon, \%} = 100 - (\text{nem, \%} + \text{kül, \%} + \text{uçucu madde, \%}) \quad (5.5)$$

**Elek Analizi:** Elek analizi ile bir zeminde, ince kum ve daha iri boyuttaki malzemenin dane çapı dağılımının tayini sağlanmaktadır ve analiz **ASTM D 421-85** standardına göre yapılmıştır. Ayrıca, zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da bu deney sonuçlarından hesaplanabilmektedir.

Atık kilin dane çapı dağılımını tayin etmek için ilk olarak, daha önceden kurutulmuş olan 750 g kil numunesi 1 gün boyunca su içerisinde bekletildikten sonra 200 numaralı (0,075mm) elek içerisinde yıkanmıştır. Yıkanan malzeme bir gün boyunca etüvde kurutulduktan sonra sırayla dizilen (3½", 2½", 2", 1¾", 1", ¾", ½", 3/8", ¼", 4, 8, 16, 30, 40, 50, 70, 100, 200 numaralı) eleklerden elenmiştir. Eleme işleminden sonra her bir elekten geçen numune yüzde olarak belirlenmiştir.

**Hidrometre Deneyi:** Hidrometre deneyi, ince daneli zeminlerin dane çapı dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Deney, farklı boyutlardaki danelerin farklı düşüş hızlarına sahip olması esasına dayanmaktadır. Daha hızlı düşüş gösteren zemin daneleri daha iri daneli olanlardır ve buradan da danelerin düşüş hızına bağlı olarak dane boyutu dağılımı belirlenebilmektedir.

Tezde kullanılan atık kilin dane çapı dağılımını belirlemek için elek analizinden sonra hidrometre deneyi de yapılmıştır. Atık kil, 200 numaralı elekten elenmiş ve 50 g numune, hidrometre deneyi için ayrılmıştır. Numune, daha önceden 125 g suda eritilmiş halde bulunan 2,4 g sodyum hegzametafosfat ile bir kap içerisinde spatulayla karıştırılmıştır. Karışım halindeki atık kilin danelerinin birbirinden ayrılması için 16 saat kap içerisinde bekletilmiştir. Bekletme işleminden sonra numune mikser içerisinde karıştırılmış ve mezür içerisine 1000 ml'ye tamamlanacak şekilde suyla birlikte doldurulmuştur. Gerekli ölçümler alınarak dane çapları belirlenmiştir.

### 5.1.2. Atık kilin kimyasal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi

Tezin bu bölümünde, atık kilin kimyasal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen katyon değişim kapasitesi (CEC), ICP-MS, XRD, XRF, SEM, FT-IR, BET ve elementel analizlerin metodları açıklanmıştır.

**Katyon Değişim Kapasitesi (CEC):** Atık kilin katyon değişim kapasitesi analizi, “**EPA Method 9081**” (Chapman Metodu) olarak da bilinen “**Sodyum Dozurma Yöntemi**” ile gerçekleştirilmiştir. Bu metodu kullanabilmek için öncelikle 1 N sodyum asetat (NaOAc) ve 1 N amonyum asetat (NH<sub>4</sub>OAc) çözeltileri hazırlanmıştır. Atıktan alınan 4 gramlık örnek sırasıyla 33 mL sodyum asetat, izopropil alkol ve amonyum asetat çözeltileri ile üç kez yıkanmıştır. Yıkama işleminden sonra santrifüj uygulanmış, son santrifüjden elde edilen berrak fazın sodyum derişimi ICP-MS cihazı ile ölçülmüştür.

**ICP-MS Analizi:** Analiz öncesinde hazırlık aşaması olarak, örnekler **EPA Metot 3051** metoduna göre Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde bulunan Milestone Start D Microwave Digestion System mikrodalga cihazı ile ekstrakte edilmiştir. Ekstrakte edilen numuneler Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler ve Süreçler Laboratuvarı’nda bulunan ICP-MS/MS (Agilent 8800) (Şekil 5.2) cihazı ile analiz edilmiştir.



Şekil 5.2. ICP-MS/MS cihazı

**XRD Analizi:** Atık kilin mineralojik karakterlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen **XRD analizi**, Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Rigaku marka Rint 2200 model XRD cihazında (şekil 5.3), 5°-80° aralığında, 0,2°/dk ile gerçekleştirilmiştir.



**şekil 5.3.** XRD cihazı

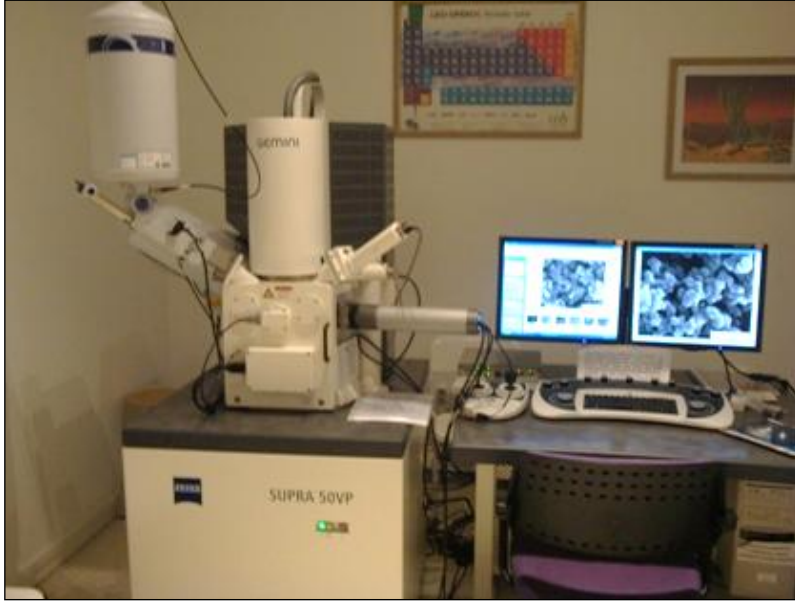
**XRF Analizi:** Bu analizde numune, X-ışınları ile bombardımana tabi tutularak, elde edilen karakteristik X-ışınlarının analiz edilmesi ile numunenin kimyasal yapısı belirlenmektedir. XRF analizi, Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Rigaku marka ZSX Primus model XRF cihazı (şekil 5.4) ile gerçekleştirilmiştir.





Şekil 5.4. XRF cihazı

**SEM Analizi:** Analiz öncesinde hazırlık aşaması olarak, elektriksel yüklenmenin engellenmesi amacıyla numune, tutucuya yerleştirilerek Argon gazı ortamında 40 saniye boyunca altın ile kaplanmıştır. SEM analizi ile, örnek yüzeyi nanometre boyutuna kadar incelenebilmektedir. Bu sayede atık kilin mineralojik yapısı ile, geomembranın sızıntı suyu çalışmalarından önce ve sonraki yapısı, sızıntı suyunun sebep olduğu yapısal değişimlerin analiz edilme imkanı doğmuştur. Analiz için Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Zeiss SUPRA 50VP marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5.Taramalı elektron mikroskobu

**FT-IR Analizi:** Malzemelerdeki fonksiyonel grupların belirlenmesi amacıyla yapılan, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) analizi Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü'nde bulunan Perkin Elmer Spektrum 100 (Şekil 5.6) FT-IR cihazı ile 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  arasında gerçekleştirilmiştir. Analiz için, % 0,01 oranında atık kil içeren atık-KBr pelletleri hazırlanmış, sadece KBr'den oluşan bir pellete karşı spektrumları alınmıştır.



Şekil 5.6. FTIR cihazı

**BET Analizi:** Katı malzemelerin yüzey alanlarının belirlenmesinde kullanılan analiz yöntemleri porozite, yoğunluk ve gaz adsorpsiyonuna dayanmakta olup, bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem olan BET (Brunauer-Emmett-Teller) ile yüzey alanı ölçümü, katı maddelerin yüzey enerjileri nedeni ile atmosferdeki gaz moleküllerini adsorplama prensibi üzerine kuruludur. Yöntemde, numune yüzeyindeki tek bir moleküler tabakayı kaplamak için gerekli gaz miktarı ( $N_2$ ) tayin edilmekte ve BET teorisine göre yüzey alanı hesaplanmaktadır (Donnet ve ark., 1993).

BET analizi için Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi, Kimya Bölümü'nde bulunan Nova 2200E Series marka BET cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.7). Ölçüm için 9 mm'lik BET hücresinin darası alınarak üzerine bir miktar örnek eklenmiş ve tartımı yapılmıştır. Tartımı yapılan örnek, cihaza yerleştirilerek  $300^{\circ}C$ 'de 17 saat gaz giderimine bırakılmış ve daha sonra örneğin yüzey alanı cihazda doğrudan ölçülmüştür.



Şekil 5.7. BET cihazı

**Elementel Analiz:** Numunelerdeki C, H, N, S elementlerinin yüzde bileşimi, Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Katı Atık Yönetimi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Leco CHN ve S elementel analiz cihazı ile

belirlenmiştir. Bu analizde, numuneler yüksek sıcaklıkta, oksijenli ortamda katalitik yakma prensibi ile yakılmakta ve oluşan yanma gazları ayrı ayrı kolonlarda tutulduktan sonra her birinin örnekteki miktarı termal iletkenlik dedektörü aracılığıyla belirlenmektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Elementel analiz cihazı

### 5.1.3. Bulgular ve değerlendirme

Atık kilin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan **nem, kül, uçucu madde miktarı ve sabit karbon miktarı** sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Atık kilin başlangıç analizleri sonuçları

| Özellik          | Değer |
|------------------|-------|
| Nem (%)          | 2,49  |
| Kül (%)          | 67,20 |
| Uçucu Madde (%)  | 27,82 |
| Sabit Karbon (%) | 2,49  |

**Elek analizi** sonucunda atık kilin %98’inin 200 numaralı elekten geçtiği görülmüştür (Çizelge 5.2). Böylece atık kilin dane çapının 0,075 mm’den küçük olduğu, numunenin filler olarak değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir.

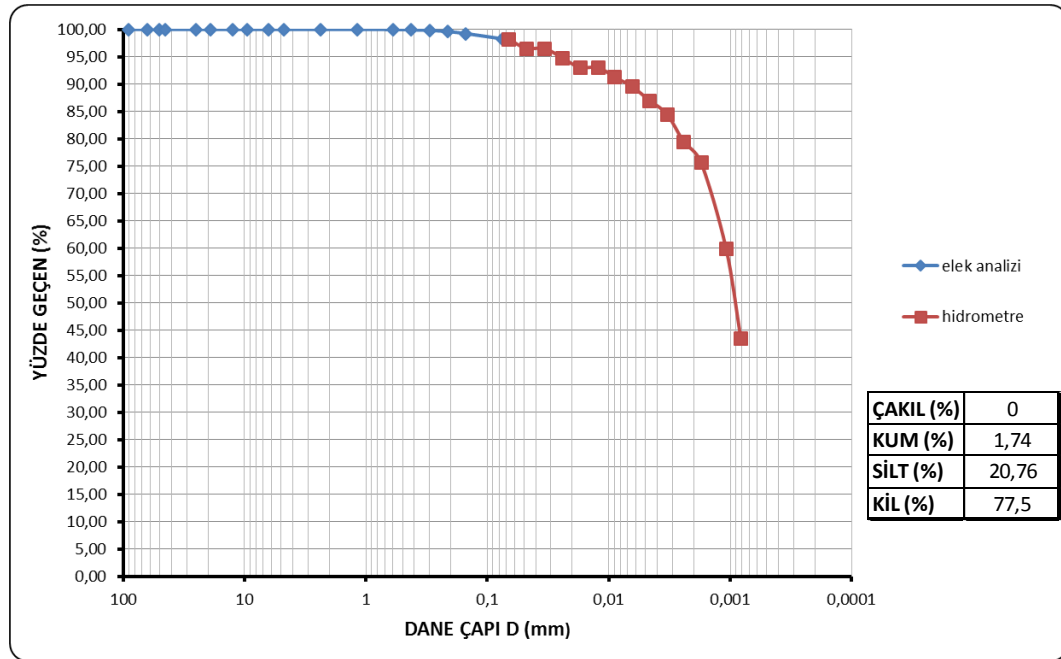
Çizelge 5.2. Elek analizi sonuçları

| Elek no | Delik çapı (mm) | Elek üstü kalan (g) | Elek üstü kalan (%) | Toplam kalan (%) | Toplam geçen (%) |
|---------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 3½*"    | 90              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 2½*"    | 63              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 2*"     | 50              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 1¾*"    | 45              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 1*"     | 25              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| ¾*"     | 19              | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| ½*"     | 12,5            | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| ¾*"     | 9,5             | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| ¼*"     | 6,3             | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 4*"     | 4,75            | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 8*"     | 2,36            | 0                   | 0,00                | 0,00             | 100,00           |
| 16*"    | 1,18            | 0,04                | 0,01                | 0,01             | 99,99            |
| 30*"    | 0,6             | 0,24                | 0,03                | 0,04             | 99,96            |
| 40*"    | 0,425           | 0,28                | 0,04                | 0,07             | 99,93            |
| 50*"    | 0,3             | 0,79                | 0,11                | 0,18             | 99,82            |
| 70*"    | 0,212           | 1,63                | 0,22                | 0,40             | 99,60            |
| 100*"   | 0,15            | 2,88                | 0,38                | 0,78             | 99,22            |
| 200*"   | 0,075           | 7,18                | 0,96                | 1,74             | 98,26            |

Çizelge 5.3. Hidrometre deneyi sonuçları

| Geçen süre (dk) | Gerçek okuma, Ra | Düzeltilmiş okuma, Rc | % Geçen | Tablodan alınan L değeri | L/t    | Tablodan alınan K değeri | D (mm)    |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------|--------------------------|--------|--------------------------|-----------|
| 0,25            | 54               | 56,5                  | 110,288 | 7,1                      | 28,400 | 0,01257                  | 0,0669876 |
| 0,50            | 53               | 55,5                  | 108,336 | 7,3                      | 14,600 | 0,01257                  | 0,0480299 |
| 1,00            | 53               | 55,5                  | 108,336 | 7,3                      | 7,3000 | 0,01257                  | 0,0339622 |
| 2               | 52               | 54,5                  | 106,384 | 7,4                      | 3,7000 | 0,01257                  | 0,0241788 |
| 4               | 51               | 53,5                  | 104,432 | 7,6                      | 1,9000 | 0,01257                  | 0,0173265 |
| 8               | 51               | 53,5                  | 104,432 | 7,6                      | 0,9500 | 0,01257                  | 0,0122517 |
| 15              | 50               | 52,5                  | 102,48  | 7,8                      | 0,5200 | 0,01257                  | 0,0090643 |
| 30              | 49               | 51,5                  | 100,528 | 7,9                      | 0,2633 | 0,01257                  | 0,0064504 |
| 60              | 47,5             | 50                    | 97,6    | 8,1                      | 0,1350 | 0,01257                  | 0,0046185 |
| 120             | 46,1             | 48,6                  | 94,8672 | 8,4                      | 0,0700 | 0,01257                  | 0,0033257 |
| 240             | 43,2             | 45,7                  | 89,2064 | 8,9                      | 0,0371 | 0,01257                  | 0,0024206 |
| 480             | 41               | 43,5                  | 84,912  | 9,2                      | 0,0192 | 0,01257                  | 0,0017402 |
| 1440            | 32               | 34,5                  | 67,344  | 10,7                     | 0,0074 | 0,01257                  | 0,0010835 |
| 2880            | 22,5             | 25                    | 48,8    | 12,2                     | 0,0042 | 0,01257                  | 0,0008181 |

Elek analizi ve hidrometre deney sonuçlarına bağlı olarak granülometri eğrisi çizilmiş ve yüzde olarak çakıl, kum, silt ve kil değerleri belirlenmiştir (Şekil 5.9). Elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçlarına bakılarak zemin sınıflandırılması yapılmış ve zemin sınıfı CH (yüksek plastisiteli kil) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.9. Granülometri eğrisi

Atık kilin **Katyon Değişim Kapasitesi analizi** sonucunda, son santrifüjden elde edilen berrak fazın sodyum derişimi ICP-MS cihazı ile 510 mg/L olarak belirlenmiştir. Literatürdeki genel uygulamaya göre, toplam adsorbe edilmiş  $\text{Na}^+$  miktarı, katyon değiştirme kapasitesi yüzdesi (CEC) olarak, bir diğer ifade ile de, değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) olarak meq/L birimi ile verilmektedir. Miliekivalent (meq) değeri, iyonun 1 mg hidrojenle yer değiştirebilen kısmının mg biriminden ağırlığı olup, iyonun atom ağırlığının tesir değerliğine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Sodyum için bu değer, 23 mg/meq'dır. Bu bilgiler ışığında atığın CEC değeri, 55,44 meq/100 gr atık kil olarak bulunmuştur (Ulutaş ve ark., 2014). Katyon değişim kapasitesinin yüksek olması, kilin daha fazla kirleticiyi bünyesinde tutabileceğini göstermektedir. Turabik ve Humbur (2003) üzerinde çalıştıkları doğal kilin katyon değişim

kapasitesi değerini 99,19 meq/100 g kil olarak bulmuşlardır. Kil minerallerinin kation değişim kapasiteleri araştırıldığında, kaolinit için 3-15 meq/100 g kil, montmorillonit için 80-150 meq/100 g kil ve organik madde için 100-350 meq/100 g kil değerleri bulunmuştur. Diğer kil mineralleri ise genellikle 10-100 meq/100 g kil aralığında değişmektedir (Young, 1976).

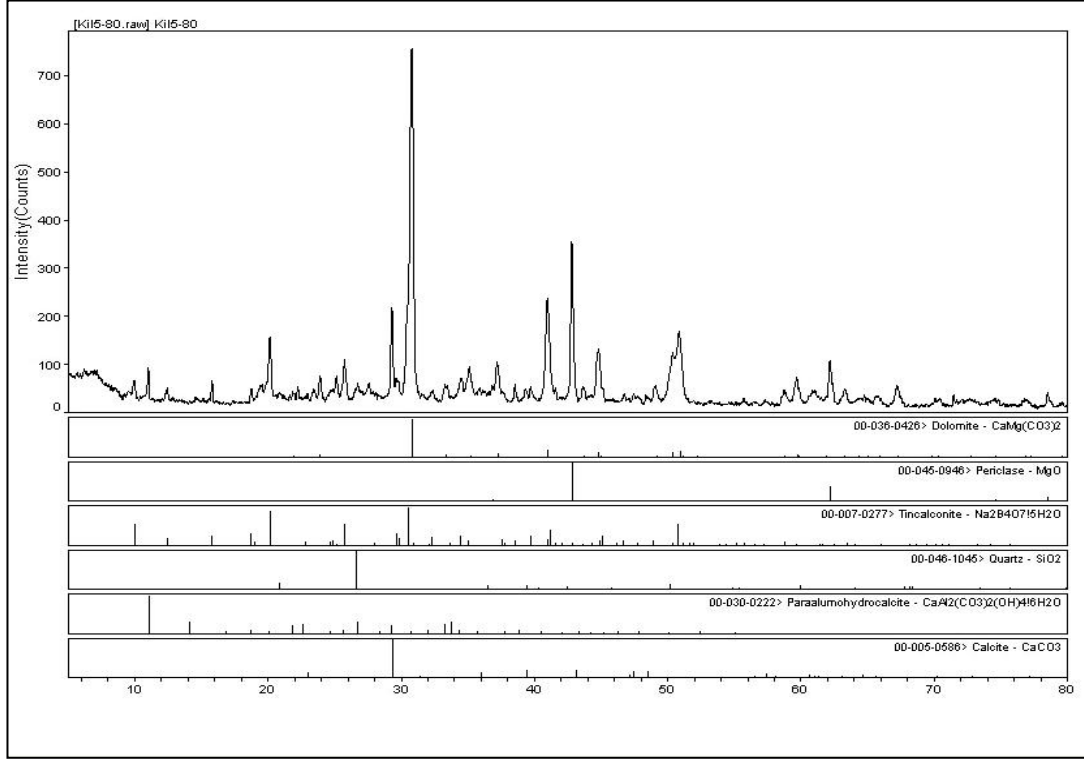
Atık kilin **ICP-MS analizi** sonuçlarına göre, atıkta en fazla bulunan elementler sırasıyla magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), bor (B), sodyum (Na), potasyum (K) ve alüminyum (Al) olarak belirlenmiştir (izelge 5.4).

**Çizelge 5.4.** Atık kilin ICP-MS analizi sonuçları

| Element | Sonuç (g/kg) | Element | Sonuç (g/kg) |
|---------|--------------|---------|--------------|
| Mg      | 68,41        | Li      | 0,93         |
| Ca      | 51,98        | Zn      | 0,52         |
| B       | 35,49        | Ni      | 0,18         |
| Na      | 18,43        | Ba      | 0,08         |
| K       | 9,37         | Mn      | 0,07         |
| Al      | 6,63         | Cu      | 0,02         |
| Sr      | 5,72         | As      | 0,02         |
| Fe      | 2,11         | Cr      | 0,01         |

Atık kilin **XRD analizi** grafiğine göre (şekil 5.10), baskın olarak gözlemlenen piklerin ait olduğu fazlar, dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), magnezyum oksit (MgO), tinkal ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), kuartz ( $\text{SiO}_2$ ), para alumo hidrokalsit ( $\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ve kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) şeklindedir. En yüksek pik dolomite ait olduğu için atığın yapısını yüksek oranda dolomit oluşturmaktadır. Bu tezde elde edilen bulgular ile paralel olarak, Kavas (2006) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Kırka Bor İşletmeleri'nden temin edilen atıkla yapılan XRD analizinde ne çıkan minerallerin dolomit, bor ve montmorillonit olduğu görülmüştür. Benzer olarak Kurama ve ark. (2004) tarafından yapılan bir diğer çalışmada da, Kırka Bor İşletmeleri'nden alınan atığın XRD analizi gerçekleştirildiğinde, yüksek piklerin kalsit, dolomit, tinkal ve montmorillonite ait olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Kozulu (2003) ve Kıpçak (2004), Kırka Bor İşletmeleri atıklarında gerçekleştirdikleri XRD analizlerinde, yapıda baskın olarak montmorillonit, dolomit ve boraks bileşiklerinin görüldüğünü ortaya koymuşlardır. Eti Maden İşletmeleri'nin Araştırma Departmanı'nda da bu sonuçları destekler nitelikte çalışmalar yapılmış, atıklardaki montmorillonit

miktarının %55'e, dolomit miktarının ise %45'e kadar çıkabildiği belirtilmiştir (Mergen ve ark., 2001).



Şekil 5.10. Atık kilin XRD spektrumu

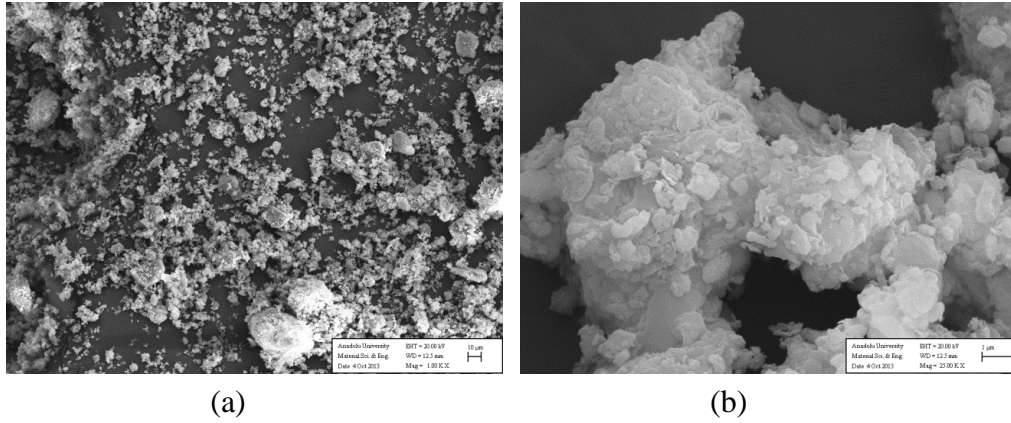
Ateş zayıyatının (A.Z.) %30,06 olarak belirlendiği **XRF analizinde**, %23,29 ile en yüksek orana sahip olan bileşiğin magnezyum oksit (MgO) olduğu saptanmıştır. Atıkta kütlece yüzdesi yüksek olan diğer bileşikler sırasıyla kuartz (SiO<sub>2</sub>; %16,88), kalsiyum oksit (CaO; %16,82), sodyum oksit (Na<sub>2</sub>O; %7,76) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; %1,99) olarak belirlenmiştir. XRF'den elde edilen tüm analiz sonuçları Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. XRF analizi sonucu

| Bileşen                        | Kütle, % | Bileşen                        | Kütle, % | Bileşen         | Kütle, % |
|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|-----------------|----------|
| MgO                            | 23,29    | SiO <sub>2</sub>               | 16,89    | CaO             | 16,82    |
| Na <sub>2</sub> O              | 7,76     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,99     | SrO             | 1,00     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,88     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,68     | SO <sub>3</sub> | 0,44     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,11     | MnO                            | 0,03     | Cl              | 0,03     |
| CuO                            | 0,02     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,01     | A.Z.            | 30,06    |



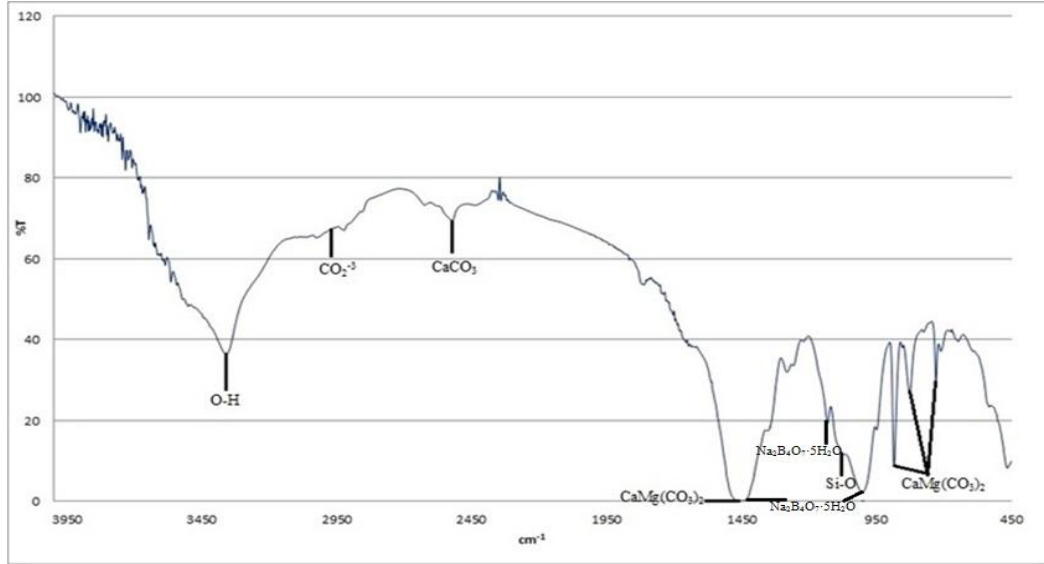
Atığın 1000X ve 25000X yakınlaştırma ile çekilen **SEM** görüntüleri sırasıyla Şekil 5.11 a ve b'de verilmiştir. Her iki şekilden de görüleceği üzere, atığın plakalar ile birlikte daha küçük taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Atığın içeriğinde birbirinden boyut ve şekil olarak farklı birçok bileşenin bulunması nedeniyle, SEM görüntülerinden yola çıkarak, atığın ortalama parçacık boyut ve yapısını tespit etmek mümkün olamamıştır.



Şekil 5.11. Atık kilin (a)1000X yakınlaştırmalı (b) 25000X yakınlaştırmalı SEM görüntüleri

Atığın **FT-IR analizi** spektrumu (Şekil 5.12) incelendiğinde, 3362 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda absorplanmış suyun O-H gerilimi görülmektedir. 2526 cm<sup>-1</sup> dalga boyu değerindeki O-H (gerilme) bağı, kilin kalsit içerdiğini gösterir (Davarcıoğlu ve ark., 2005). 3050 ve 2850 cm<sup>-1</sup> dalga boyu değerleri aralığında ise karbonatın varlığını gösteren pik bulunur (Ji ve ark., 2009). Bu pikler, atığın FTIR analizine bakıldığında 3025 ve 2923 cm<sup>-1</sup> dalga boyu aralığında görülmektedir. 1450, 883, 827 ve 728 cm<sup>-1</sup> dalga boylarındaki pikler, kilin dolomit açısından zengin olduğunu göstermektedir (Çırak, 2010). 1482-1426 cm<sup>-1</sup> aralığında ve 1130 ile 1000 cm<sup>-1</sup> dalga boyu değerlerindeki pikler, B-O bağının varlığını göstermektedir. B-O bağının görülmesi, atığın içindeki tinkal varlığını doğrulamaktadır (Gümüş ve ark., 2011, Park ve ark., 2004). 1450 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki derin pik, dolomitin varlığı ile O-H bağlarının eğilme titreşimini göstermektedir. 883 ve 728 cm<sup>-1</sup> dalga boylarında gözlemlenen pikler, dolomitin yapısındaki magnezyum ve kalsiyumun karbon ile aralarındaki bağların (Ca-C ve Mg-C) geriliminin sebep olduğu titreşimden kaynaklanmaktadır (Jarrahian ve ark., 2012). 1058 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda görülen Si-O gerilimi, atığın kuvars

içerdiğini gösterir (Yalçın ve ark., 2001). Atığın FT-IR analizi sonuçları, XRD, XRF ve ICP-MS sonuçları ile desteklenmektedir. Bugüne değin kil mineralleri üzerine yapılan FT-IR ile karakterizasyon çalışmalarında da bu bulguları destekleyen sonuçlar elde edilmiştir (Uzun ve ark., 2005, Sarıkaya ve ark., 2001, Ahlatçı ve ark., 2012).



Şekil 5.12. Atık kilin FT-IR spektrumu

**BET analizi** sonucunda atık kil numunesinin spesifik yüzey alanının  $5,12 \pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$  olduğu bulunmuştur. Literatürde dolomit mineralinin baskın olduğu killerde spesifik yüzey alanı  $2,2 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirtilmektedir (Maček 2013). Killerin yüzey alanı azaldıkça, yüzeyde bulunan elektrik yükleri yoğunluğu artar ve şişme özelliği gösteren killerde, yüzey alanı oldukça düşük kalmaktadır (Yükselen ve Kaya). Bu nedenle atık kilin, dolomite göre yüksek olan yüzey alanının, daha düşük şişme özelliği gösterebileceğinin işareti olduğu kanısına varılmıştır.

**Elementel analiz** sonucunda C, H, N, S yüzdeleri belirlendikten sonra oksijen yüzdesi, C, H, N, S, nem ve kül yüzdelerinin toplamları kullanılarak farktan hesaplanmıştır. (Nem: %2,49, Kül: %67,2). Atık kilin elementel analiz sonucu Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Elementel analiz, organik maddelerin bileşiminin belirlenmesinde kullanılmaktadır ve atık kil için elde edilen sonuçlarda beklendiği gibi kildeki organik madde miktarının çok düşük olması,

kilin anorganik yapıya sahip olduğunu belirleyen XRD, XRF, ICP-MS ve FT-IR analizleri sonuçlarını da destekler niteliktedir.

**Çizelge 5.6.** Atık kilin elementel analiz sonuçları

| Bileşen | % (Ağırlık bazında) |
|---------|---------------------|
| C       | 7,68                |
| H       | <0,001              |
| N       | <0,001              |
| O       | 22,63               |
| S       | <0,001              |

## **5.2. Atık Kilin DDT'lerde Geomembran Üretiminde Kullanımı ile İlgili Deneysel Çalışmalar**

Bor işletmeleri atığının düzenli depolama tesislerinde kullanılan geomembran tabakanın üretiminde değerlendirilmesi amacı ile, atık kil, bitüm, bentonit ve atık lastik ile karıştırılmış ve en uygun bileşim bulunmaya çalışılmıştır. Bitüm esaslı geomembranın oluşturulması için yapılan yoğun bir deneme sürecinden sonra, taşıyıcı malzeme olarak polyester keçe ve cam elyaf tülünün kullanılmasına karar verilmiş ve deneyler bu doğrultuda yürütülmüştür.

### **5.2.1. Geomembran üretiminde kullanılan malzemeler**

Geomembran üretiminde kullanılan atık kil, bitüm, bentonit ve atık lastik ile taşıyıcı malzemelerin her biri hakkında detaylı bilgi izleyen kısımlarda sunulmuştur.

**Atık Kil:** Eti Maden İşletmeleri, Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne ait olan bor türevleri tesisinden temin edilen atık kilin özellikleri, Çizelge 5.7'de verilmiştir (Ulutaş ve ark., 2014; Bayrakçı ve ark., 2014).

**Çizelge 5.7.** Bor türevleri atığının özellikleri

| Özellik                               | Değer                 |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Su muhtevası (%)                      | 39,2                  |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,77                  |
| Plastik limit (%)                     | 30                    |
| Likit limit (%)                       | 58                    |
| Plastisite indeksi (%)                | 28                    |
| Basınç dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> ) | 2,16                  |
| Hidrolik iletkenlik (m/s)             | $3,5 \times 10^{-11}$ |
| Şişme potansiyeli (%)                 | 10,4                  |

**Bitüm:** Zemini suyun zararlı etkilerinden koruma ve daneleri birleştirme yönünde bir rol oynayan ve danelerin yüzeyini kaplayan bitüm, ince daneli zeminlerin sudan dolayı yumuşamasını önleyici bir etki gösterirken, iri danelerden oluşan zeminlerin ise kohezyon kazanmasına yol açmaktadır. Ayrıca, danelerin birbirine yapışmasını sağlayıcı etkisi sonucu su ve rüzgar erozyonuna karşı direnci de artırmaktadır. Bitüm ile yapılan stabilizasyonda zeminlerin hem geçirimsizliği hem de mukavemeti önemli ölçüde artabilmektedir (Tumluer, 2006). Tezde kullanılan bitüm, TÜPRAŞ'tan temin edilmiş olup, özellikleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

**Çizelge 5.8.** Tezde kullanılan bitümün özellikleri

| Özellik                                     | Değer   |
|---|---------|
| Penetrasyon (25°C, 100g, 5 saniye)          | 100/150 |
| Yumuşama noktası (°C)                       | 39-47   |
| Isıtmadaki kayıp (%)                        | 0.8     |
| Kalıcı penetrasyon (%)                      | 43      |
| Sertleştirmeden sonra yumuşama noktası (°C) | 41      |
| Parlama noktası (°C)                        | 230     |
| Çözünürlük (% ağırlık)                      | 99      |
| Yumuşama noktası yükselmesi (°C)            | 11      |

**Bentonit:** Volkanik killerin normal ortamlarda kalıp, kimyasal reaksiyonlara uğramasıyla veya kayaların suda ayrışmasıyla oluşan bentonit, çok ince yassı koloidal parçacıklardan oluşur. Ağırlıklı olarak kil minerallerinin montmorillonit grubunun oluşturduğu bir malzemedir. Doğal bentonit, kazıldığı zaman yüksek su muhtevasına sahip, kaygan dokulu, yumuşak bir kaya görüntüsüne sahiptir. Bentonit koloidal alüminyum hidrosilikattır. Hacmi su ile

10 - 30 kat arasında artış gösterir. Sıcaklığı 200 °C'nin üstüne çıkıncaya kadar şişme özelliğini korur ve 600 °C'nin üzerinde şişme özelliğini tamamen kaybeder. Düşey geçirgenliği,  $4,09 \times 10^{-10}$  cm/sn ve yanal şişme basıncı,  $4,48 \text{ kg/cm}^2$ 'dir (Taşpolat ve ark., 2006). Bentonit partiküllerinin net elektrik yükü negatiftir ve negatif yüklü bentonit yüzeyi nedeniyle gözenek akışkanındaki katyonlar suda çözülür (Chalermyanont ve ark., 2008).

Bentonit genellikle düzenli depolama sahalarında geçirimsizlik ve örtü tabakası sistemlerinde sıkıştırılmış toprak tabakasının iyileştirilmesinde, düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir bileşen olarak geosentetik kil tabakalarında ve toprak-bentonit veya çimento bentonit karışımından oluşan dolgu tabakası ile dikey sızdırmazlık perdesi olarak kullanılmaktadır. Bentonitlerin büyük kısmı sodyum veya kalsiyum bentonit olmakta, sodyum bentonit yüksek şişme kapasitesi ve suya karşı düşük hidrolik iletkenlik değeri ile kalsiyum bentonite göre daha fazla kullanım alanı bulmaktadır (Gleason ve ark., 1997).

**Atık Lastik:** Ülkemizde bir yılda üretilen 24 milyon adet lastiğin yaklaşık 8,5 milyonu (200.000 ton) atık haline gelmekte ve ekonomik olarak kullanımı son derece sınırlı kalmaktadır. Atık lastiklerin depolandıkları alanlarda oluşturdukları en önemli çevre sorunları, yığınlarda meydana gelen şiddetli yangınlar ile lastiğin büyük hacimli ve boşluklu yapısından dolayı bu yığınlarda yaşama fırsatı bulan örümcekler ve kemirici hayvanlardır. Araç lastiklerinin içlerinin boşluklu olması yangının sönmelerini zorlaştırmakta bu nedenle de atmosfere tonlarca zararlı bileşik yayılmaktadır. Siyah bir bulut gibi atmosfere yayılan bu maddeler içinde; karbon siyahı, uçucu organikler, yarı-uçucu organikler, çok halkalı hidrokarbonlar, yağlar, kükürt oksitler, azot oksitler, nitrosaminler, karbon oksitleri, uçucu partiküller ve As, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe vb. gibi metaller bulunabilmektedir (Banar ve ark., 2011; Akyıldız, 2011).

**Taşıyıcı Malzemeler:** Tüm analizler sonunda seçilen optimum geomembran karışımının ticari bir geomembran ile karşılaştırılabilmesi adına, yapılan bir çok deneysel çalışma sonucunda, taşıyıcı malzemeler ticari geomembranlarda da sıklıkla kullanılan polyester keçe ve cam elyaf tülü olarak seçilmiştir. Kullanılan taşıyıcı malzemelerin kalınlık, birim alan kütlesi, çekme dayanımı ve uzama değerleri Çizelge 5.9'da belirtilmiştir.

**Çizelge 5.9.** Polyester keçe ve cam elyaf tülün özellikleri

| Taşıyıcı       | Kalınlık (mm) | Birim alan kütlesi (kg/m <sup>2</sup> ) | Çekme dayanımı (MPa) | Uzama (%) |
|----------------|---------------|---|----------------------|-----------|
| Polyester keçe | 0,5           | 0,148                                   | 15,54                | 40        |
| Cam elyaf tülü | 0,25          | 0,044                                   | 8,36                 | 1,4       |

### **5.2.2. En uygun geomembran karışımının üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi**

Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda karışımların oluşturulması sırasında, dayanıklı malzeme üretiminin yanı sıra, kullanılan atık kil miktarının olabildiğince yüksek tutulması göz önüne alınmış olan en önemli parametredir. Bu nedenle farklı oranlarda pek çok deneme çalışması yapılmış ve baz olarak alınan bitüm/atık kil karışımlarındaki atık kil miktarının minimum %50 olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu oranda atık kil kullanıldığında, karışım oldukça akışkan bir forma sahip olmakta ve ekstrüdere beslemesi uygun olmaktadır. Deneme çalışmalarında aynı zamanda atık kil miktarı artırıldıkça, bitüm miktarının 1 kg'lık numunede % 30'dan daha düşük olamayacağı da görülmüştür. Bitüm miktarının % 30'dan daha düşük tutularak yapıldığı deneylerde, karışımın akışkanlığını kaybettiği, dolayısıyla ekstrüdere beslenemediği için kullanılamayacağı görülmüştür. Bitüm/atık kil, bitüm/atık kil/atık lastik ve bitüm/atık kil/bentonit karışımları için belirlenen karışım oranları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Oranları belirtilen geomembran malzeme karışımları öncelikle Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Katı Atık Yönetimi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan UTEST marka laboratuvar mikseri (Şekil 5.13) ile karıştırılmıştır.

Karışımların hazırlanmasından önce, belirlenen bitüm miktarı tartılarak laboratuvar mikserine yerleştirilmiş ve 80°C sıcaklıkta karıştırılmadan eritilmiştir. Bitüm tamamen sıvı forma geçtiğinde karıştırma işlemi başlatılmış ve gerekli miktarda tartılan atık kil, kademeli olarak bitüme eklenmiştir. Sıcaklık 100°C'ye yükseltilerek tamamen homojen bir malzeme elde edilene kadar mikser ile sabit devirde 45 dakika boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir.

**Çizelge 5.10.** Hazırlanan bitümlü karışımlar ve oranları

| Numune Kodu*   | Bitüm (%) | Atık kil (%) | Atık Lastik (%) | Bentonit (%) |
|----------------|-----------|--------------|-----------------|--------------|
| BTM30CW70      | 30        | 70           | -               | -            |
| BTM40CW60      | 40        | 60           | -               | -            |
| BTM50CW50      | 50        | 50           | -               | -            |
| BTM40CW50TW10  | 40        | 50           | 10              | -            |
| BTM40CW52TW8   | 40        | 52           | 8               | -            |
| BTM40CW55TW5   | 40        | 55           | 5               | -            |
| BTM40CW50BNT10 | 40        | 50           | -               | 10           |
| BTM40CW52BNT8  | 40        | 52           | -               | 8            |
| BTM40CW55BNT5  | 40        | 55           | -               | 5            |

\*BTM50CW50: %50 Bitüm %50 Kil; BTM40CW60: %40 Bitüm %60 Kil; BTM30CW70: %30 Bitüm %70 Kil; BTM40CW50TW10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Atık Lastik; BTM40CW52TW8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Atık Lastik; BTM40CW55TW5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Atık Lastik; BTM40CW50BNT10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Bentonit; BTM40CW52BNT8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Bentonit; BTM40CW55BNT5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Bentonit.



**Şekil 5.13.** UTEST laboratuvar mikseri

Mikserde hazırlanan sıcak karışımlardan Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Katı Atık Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan çift vidalı ekstrüderle (Şekil 5.14) (16mm; L/D:40), sabit kalınlık ve genişlikte, şeritler halinde geomembran malzemeler üretilmiştir.



**Şekil 5.14.** Çift vidalı ekstrüder

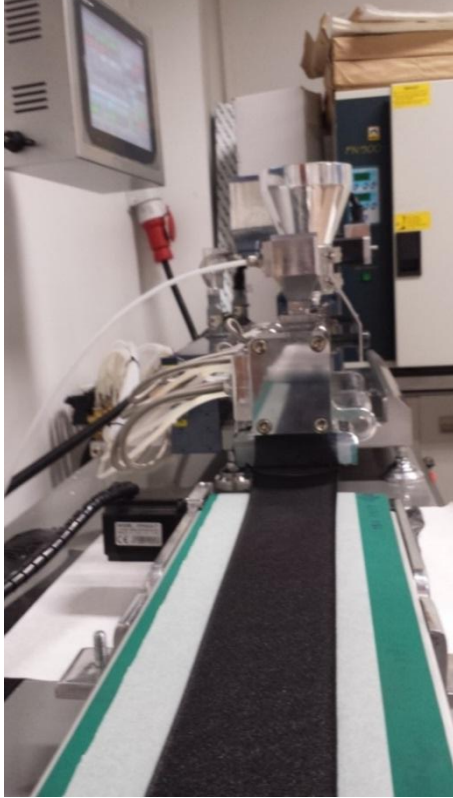
Karıştırma işlemlerinde, ekstrüderin kovan sıcaklıkları ve vida dönüş hızı, çıkan ürünün genişliği, akışkanlığı ve düzgünlüğüne bakılarak farklı denemelerle optimizasyonu yapılmaya çalışılmış ve her bir karışım için ayrı ayrı ekstrüzyon sıcaklık profilleri oluşturulmuştur (Çizelge 5.11). Malzemeler, uygun profile göre ekstrüderden geçirilmiş ve çıkış ucunda bulunan 1 rpm hızla dönen konveyör banda alınarak 8 cm genişliğinde, 1-1,5 mm kalınlık aralığında, deliksiz, düzgün görümlü bitümlü karışım numuneleri elde edilmiştir (Şekil 5.15). Bitümlü karışım numuneleri, ekstrüder çıkışında görünüm açısından düzgün çıkan kısım henüz konveyör bant üzerinde ilerlerken ve çıkış sıcaklığına sahipken, banttaki bitümlü karışım şeridinin yarısının (yaklaşık 50 cm uzunluğunda) üzerine taşıyıcı malzeme yerleştirilerek, diğer yarısı taşıyıcının üzerine katlanmış ve üzerine basınç uygulanarak geomembran oluşturulmuştur (Şekil 5.16a, b, c, d).



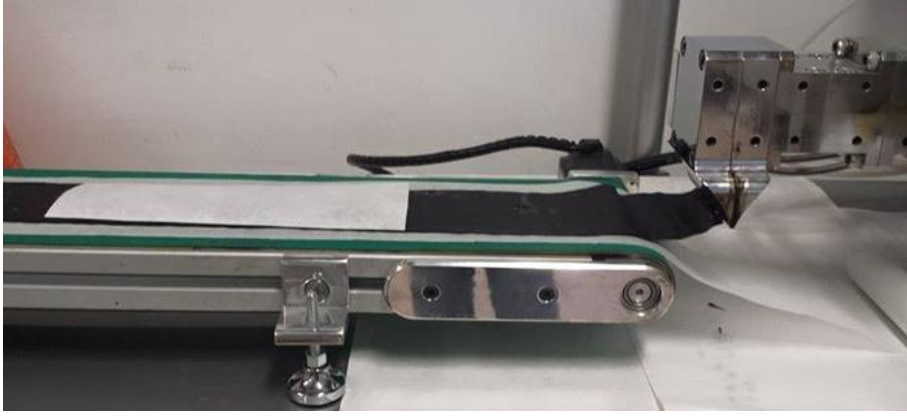
Çizelge 5.11. Ekstrüzyon sıcaklık profilleri

| NUMUNE KODU*   | Çıkış<br>(°C) | 7<br>(°C) | 6<br>(°C) | 5<br>(°C) | 4<br>(°C) | 3<br>(°C) | 2<br>(°C) | 1<br>(°C) | Boğaz<br>(°C) | Giriş<br>(°C) | Vida<br>Hızı<br>(rpm) |
|----------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------------------|
| BTM50CW50      | 38            | 32        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 68        | 70            | 100           | 20                    |
| BTM40CW60      | 43            | 40        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 68        | 70            | 100           | 25                    |
| BTM30CW70      | 43            | 50        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 72        | 70            | 110           | 25                    |
| BTM40CW50TW10  | 52            | 47        | 70        | 74        | 77        | 83        | 85        | 90        | 75            | 130           | 45                    |
| BTM40CW52TW8   | 45            | 43        | 70        | 74        | 77        | 83        | 85        | 90        | 80            | 130           | 30                    |
| BTM40CW55TW5   | 45            | 43        | 70        | 74        | 77        | 83        | 85        | 90        | 80            | 130           | 30                    |
| BTM40CW50BNT10 | 43            | 40        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 68        | 70            | 100           | 25                    |
| BTM40CW52BNT8  | 43            | 40        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 68        | 70            | 100           | 25                    |
| BTM40CW55BNT5  | 43            | 40        | 50        | 72        | 72        | 70        | 70        | 68        | 70            | 100           | 25                    |

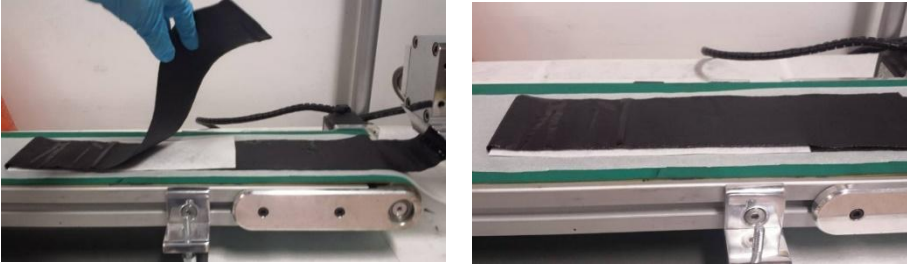
\*BTM50CW50: %50 Bitüm %50 Kil; BTM40CW60: %40 Bitüm %60 Kil; BTM30CW70: %30 Bitüm %70 Kil; BTM40CW50TW10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Atık Lastik; BTM40CW52TW8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Atık Lastik; BTM40CW55TW5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Atık Lastik; BTM40CW50BNT10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Bentonit; BTM40CW52BNT8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Bentonit; BTM40CW55BNT5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Bentonit.



Şekil 5.15. Ekstrüderden çıkan bitümlü karışım numunesi



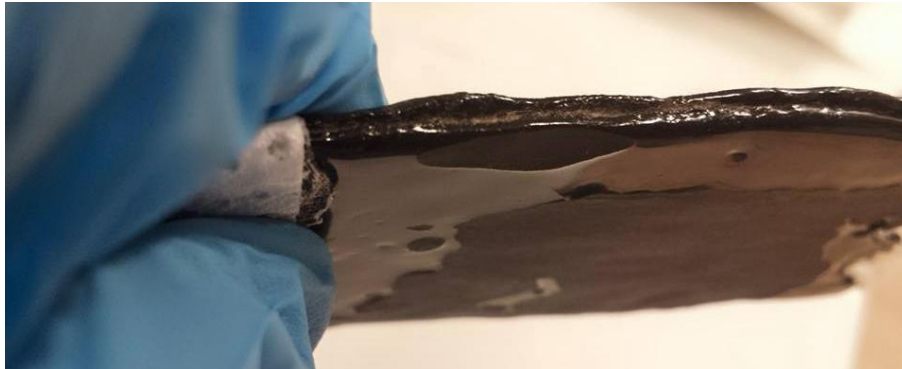
(a)



(b)



(c)



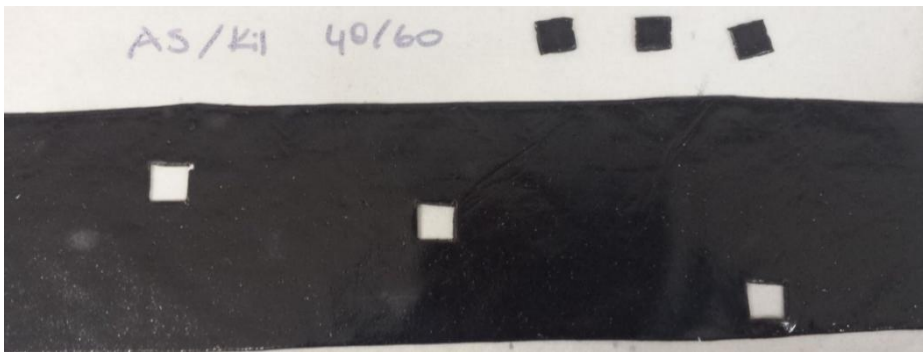
(d)

**Şekil 5.16.** (a) Ekstrüderden çıkan bitümlü karışıma taşıyıcının yerleştirilmesi (b) karışımın katlanarak geomembran oluşturulması (c) basınç uygulanarak taşıyıcının bitüm ile kaplanması (d) geomembran numunesi

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY) EK-3'te atık depolama sahalarında geomembran olarak kullanılacak malzemelerin **TS EN 13493** Standardı'na “**Geosentetik Bariyerler - Katı Atık Depolama ve Bertaraf Etme Yerlerinde Kullanım İçin Gerekli Özellikler**” uygun olması gerektiği belirtildiğinden, üretilen tüm geomembran numunelerinin **TS EN 13493**'e göre kalınlık, birim alan kütlesi, çekme dayanımı, uzama ve hidrolik iletkenlik testleri de yapılmış olup, bu tayinler aşağıda sunulmuştur:

**Kalınlık ve Birim Alan Kütlesi Tayinleri:** Her iki tayin de, **TS EN 1849-1** “**Kalınlık ve Birim Alan Kütlesinin Tayini**” standardına göre yapılmıştır. Deney numuneleri, deney parçasından 20 cm uzunluğunda kesilmiş ve 20 saat boyunca 23°C'de bekletilerek şartlandırılmıştır. Kalınlık tayininde, şartlandırılmış numunede, 0,01 mm hassasiyetle çalışan dijital kumpas ile eşit aralıklarla 10 farklı yerden ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Birim alan kütlesi tayininde deney numuneleri, deney parçasından 20 cm uzunluğunda kesilip, 20 saat boyunca 23°C'de bekletilerek şartlandırılmıştır. Şartlandırılmış numunede, 3 farklı yerden, alanı  $100\text{mm}^2 \pm 1$  olan kare şeklinde numune kesilip çıkartılmış (Şekil 5.17), her numune tartılmış ve kütleleri en yakın 0,1 g'a yuvarlanarak kaydedilmiştir. Üç adet ölçümün ortalaması alınıp 10 ile çarpılarak birim alan kütlesi  $\text{kg/m}^2$  birimi ile ifade edilmiştir.



Şekil 5.17. Birim alan kütlesi ölçümünde kullanılan numuneler

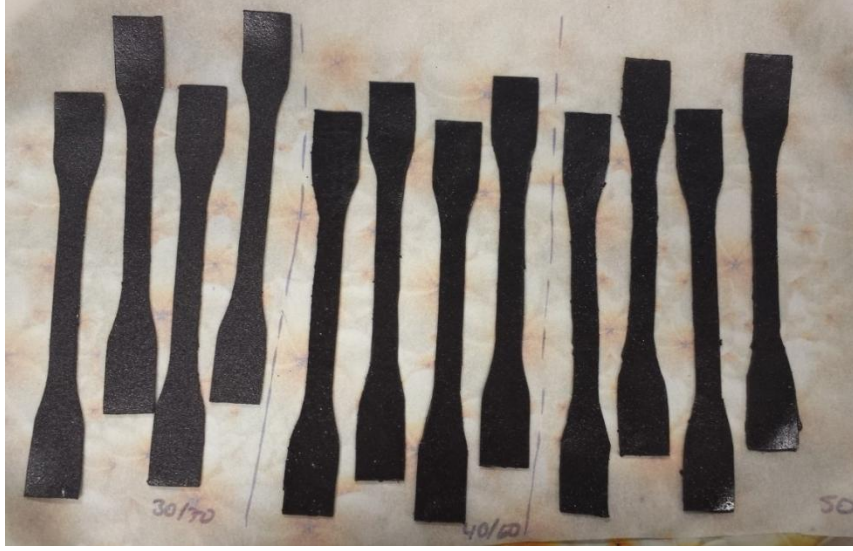
**Çekme Dayanımı ve Uzama Miktarı Tayinleri:** Bu analizler, **TS EN 12311-1** standardına göre Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Bölümü'nde bulunan Instron 5944 çekme deneyi cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.18).

Bitümlü karışımlardan oluşan deney numuneleri, dog bone (kemik) şeklinde kesilmiş (Şekil 5.19), taşıyıcının bitümlü karışım ile kaplandığı geomembran numuneleri ise 10 cm x 5cm boyutlarında kesilmiş (Şekil 5.20) ve tüm numuneler deneyden önce 23°C sıcaklıkta 20 saat bekletilmiştir. Deney sırasında uygulanan en büyük çekme kuvveti ve bu kuvvet altında deney numunesinde oluşan uzama kaydedilmiştir. Her numune için üç tekrar yapılmış, bunların ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.18. Instron 5944 çekme deneyi cihazı



Şekil 5.19. Bitümlü karışımların çekme/uzama deney numuneleri



Şekil 5.20. Bitümlü geomembranların çekme/uzama deney numuneleri

**Hidrolik İletkenlik Testi:** Bu testle ilgili deneyler, **TS EN 14150** standardına göre 113Y122 no'lu TÜBİTAK projesi ekibi tarafından tasarlanan ve Anadolu Üniversitesi Atölyeler Müdürlüğü tarafından üretilen deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Hidrolik iletkenlik deney düzeneği

Deney düzeneğinin tasarımı aşamasında, standartta açıklanan hücre iki parçalı olacak şekilde, uzun süreli suya daldırma esnasında oksitlenmeye dirençli malzemedan üretilmiştir. Hücrenin her bir kısmındaki boşluklar hidrolik basıncın uygulanmasını sağlamakta ve akış aşağı boşluğa yerleştirilen poröz disk, geosentetik bariyerdeki şekil değişikliğini önlemektedir. Hücre, herhangi bir sızıntı olmaksızın, numuneyi kavrayacak şekilde tasarlanmıştır. Sıkıştırma sistemi gerekli olmayıp düz yüzeyleri birbirine kelepçeleme sistemi, genellikle yeterli olmaktadır. Ölçme bölmelerinin çapı standartta minimum 200 mm önerilmesine rağmen, ekstrüderden ortalama 8 cm genişliğinde, şerit halinde bitümlü malzeme elde edilebildiği için, hidrolik iletkenlik ölçüm hücresinin çapı 50 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

Hacim ölçme cihazı, standartta Tip A cihaz olarak açıklanan kılcal borulardan oluşan sistemdir. Basınç, kılcal borular içerisindeki hava basıncı yoluyla uygulanmakta ve regülatör yardımıyla kontrol edilmektedir. Her kılcal boru ve hücre arasında olmak üzere, deneyden önce çukurların doldurulması ve deney esnasında kılcal boru içerisindeki sıvı seviyelerini ayarlamak için, hücreye bir sıvı deposu bağlanmıştır. Sıcaklığın sıvı hacmi üzerinde etkisi olması sebebiyle, deneyler 23° sıcaklıktaki termostatik banyo içerisinde yapılmıştır.

### 5.2.3. Bulgular ve değerlendirme

Kalınlık ve Birim Alan Kütlesi Analizleri sonuçları Çizelge 5.12’de verilmiştir. Üretilen geomembranların analiz sonuçlarını karşılaştırmak üzere, ticari bir bitümlü geomembran alınarak aynı analizler yapılmıştır.

**Taşıyıcısız** bitüm/atık kil karışımlarında kil miktarı arttıkça kalınlık ve birim alan kütlesi de artmaktadır. Bitüm/atık kil/atık lastik karışımlarında bitüm miktarı sabit tutulurken, karışımdaki kil miktarının azaltılarak atık lastik miktarının artırılması, kalınlık ve birim alan kütlesi değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Bu durum, **bitüm/atık kil/bentonit** karışımları için de geçerlidir. En yüksek birim alan kütlesi 2,7 kg/m<sup>2</sup> ile BTM40CW55BNT5 (%40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Bentonit) numunesinde elde edilirken, en kalın numune 1,7 mm ile BTM40CW55TW5 (%40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Atık Lastik)’dir.

**Çizelge 5.12.** Kalınlık ve birim alan kütlesi analizleri sonuçları

|   | Numune Kodu*      | Kalınlık (mm) | Birim alan kütlesi (kg/m <sup>2</sup> ) |
|---|-------------------|---------------|---|
| Taşıyıcısız   | BTM30CW70         | 1,4           | 2,2                                     |
|   | BTM40CW60         | 1,3           | 2,0                                     |
|   | BTM50CW50         | 1,2           | 1,8                                     |
|   | BTM40CW50TW10     | 1,5           | 2,3                                     |
|   | BTM40CW52TW8      | 1,5           | 2,5                                     |
|   | BTM40CW55TW5      | 1,7           | 2,6                                     |
|   | BTM40CW50BNT10    | 1,4           | 2,3                                     |
|   | BTM40CW52BNT8     | 1,4           | 2,5                                     |
|   | BTM40CW55BNT5     | 1,5           | 2,7                                     |
| Polyester Keçe Taşıyıcılı   | PK-BTM30CW70      | 3,2           | 4,5                                     |
|   | PK-BTM40CW60      | 2,5           | 4,1                                     |
|   | PK-BTM50CW50      | 3,0           | 3,7                                     |
|   | PK-BTM40CW50TW10  | 3,2           | 4,7                                     |
|   | PK-BTM40CW52TW8   | 3,5           | 5,1                                     |
|   | PK-BTM40CW55TW5   | 3,6           | 5,3                                     |
|   | PK-BTM40CW50BNT10 | 3,1           | 4,7                                     |
|   | PK-BTM40CW52BNT8  | 3,4           | 5,0                                     |
|   | PK-BTM40CW55BNT5  | 3,4           | 5,5                                     |
| Cam Elyaf Taşıyıcılı  | CT-BTM30CW70      | 3,2           | 4,4                                     |
|   | CT-BTM40CW60      | 2,7           | 4,0                                     |
|   | CT-BTM50CW50      | 2,8           | 3,6                                     |
|   | CT-BTM40CW50TW10  | 3,2           | 4,6                                     |
|   | CT-BTM40CW52TW8   | 3,7           | 5,0                                     |
|   | CT-BTM40CW55TW5   | 3,6           | 5,2                                     |
|   | CT-BTM40CW50BNT10 | 3,0           | 5,4                                     |
|   | CT-BTM40CW52BNT8  | 3,1           | 4,9                                     |
|   | CT-BTM40CW55BNT5  | 3,2           | 4,6                                     |
| Ticari geomembran   | 3,2               | 3,6           |   |
| *BTM50CW50: %50 Bitüm %50 Kil; BTM40CW60: %40 Bitüm %60 Kil; BTM30CW70: %30 Bitüm %70 Kil; BTM40CW50TW10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Atık Lastik; BTM40CW52TW8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Atık Lastik; BTM40CW55TW5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Atık Lastik; BTM40CW50BNT10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Bentonit; BTM40CW52BNT8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Bentonit; BTM40CW55BNT5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Bentonit<br>**PK-: Polyester keçe taşıyıcılı, CT: Cam elyaf tül taşıyıcılı |                   |               |   |

**Polyester keçe taşıyıcılı** geomembranlar arasında en yüksek kalınlığa sahip numune 3,6 mm ile PK-BTM40CW55TW5 (Polyester Keçe, %40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Atık Lastik) iken birim alan kütlesi en yüksek numune 5,5 kg/m<sup>2</sup> ile PK-BTM40CW55BNT5 (Polyester Keçe, %40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Bentonit)'dir. Taşıyıcısız geomembranların aksine kalınlık ve birim alan kütlesi değerlerinin doğrusal artmayışının sebebi, taşıyıcı malzeme geomembran katmanları arasına yerleştirildikten sonra uygulanan basıncın otomatik ve kontrollü bir sistemle değil, manuel olarak uygulanmasıdır.

**Cam elyaf tülü taşıyıcılı** geomembranlar arasında ise en yüksek kalınlığa sahip numune 3,7 mm ile CT-BTM40CW52TW8 (Cam Tülü, %40 Bitüm, %52 Atık Kil, %8 Atık Lastik) iken birim alan kütlesi en yüksek numune 5,4 kg/m<sup>2</sup> ile CT-BTM40CW50BNT10 (Cam Tülü, %40 Bitüm, %50 Atık Kil, %10 Bentonit)'dur.

**Çekme Dayanımı ve Uzama Analizleri** sonuçları Çizelge 5.13'de verilmiştir. Üretilen geomembranların analiz sonuçlarını karşılaştırmak üzere, ticari bir bitümlü geomembran alınarak aynı analizler yapılmıştır.

**Çizelge 5.13.** Çekme dayanımı ve uzama analizleri sonuçları

|   | <b>Numune Kodu*</b> | <b>Çekme dayanımı (MPa)</b> | <b>Uzama (%)</b> |
|---|---------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Taşıyıcısız</b>  | BTM30CW70           | 0,22                        | 20               |
|   | BTM40CW60           | 0,16                        | 20               |
|   | BTM50CW50           | 0,08                        | 20               |
|   | BTM40CW50TW10       | 0,18                        | 50               |
|   | BTM40CW52TW8        | 0,14                        | 30               |
|   | BTM40CW55TW5        | 0,12                        | 32               |
|   | BTM40CW50BNT10      | 0,07                        | 20               |
|   | BTM40CW52BNT8       | 0,08                        | 20               |
|   | BTM40CW55BNT5       | 0,08                        | 20               |
| <b>Polyester Keçe Taşıyıcılı</b>  | PK-BTM30CW70        | 3,08                        | 68               |
|   | PK-BTM40CW60        | 3,37                        | 57               |
|   | PK-BTM50CW50        | 3,22                        | 68               |
|   | PK-BTM40CW50TW10    | 3,18                        | 35               |
|   | PK-BTM40CW52TW8     | 2,82                        | 59               |
|   | PK-BTM40CW55TW5     | 2,77                        | 59               |
|   | PK-BTM40CW50BNT10   | 2,62                        | 53               |
|   | PK-BTM40CW52BNT8    | 2,72                        | 62               |
|   | PK-BTM40CW55BNT5    | 2,92                        | 67               |
| <b>Cam Elyaf Taşıyıcılı</b>   | CT-BTM30CW70        | 3,22                        | 7                |
|   | CT-BTM40CW60        | 4,73                        | 7                |
|   | CT-BTM50CW50        | 3,29                        | 7                |
|   | CT-BTM40CW50TW10    | 1,94                        | 5                |
|   | CT-BTM40CW52TW8     | 3,03                        | 7                |
|   | CT-BTM40CW55TW5     | 2,70                        | 7                |
|   | CT-BTM40CW50BNT10   | 3,68                        | 7                |
|   | CT-BTM40CW52BNT8    | 3,70                        | 8                |
|   | CT-BTM40CW55BNT5    | 3,75                        | 7                |
| Ticari geomembran   |                     | 2,52                        | 75               |
| *BTM50CW50: %50 Bitüm %50 Kil; BTM40CW60: %40 Bitüm %60 Kil; BTM30CW70: %30 Bitüm %70 Kil; BTM40CW50TW10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Atık Lastik; BTM40CW52TW8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Atık Lastik; BTM40CW55TW5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Atık Lastik; BTM40CW50BNT10: %40 Bitüm %50 Kil %10 Bentonit; BTM40CW52BNT8: %40 Bitüm %52 Kil %8 Bentonit; BTM40CW55BNT5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Bentonit |                     |                             |                  |
| **PK-: Polyester keçe taşıyıcılı, CT: Cam elyaf tül taşıyıcılı  |                     |                             |                  |



**Taşıyıcısız** karışımların çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, çekme dayanımının, karışımdaki bitüm miktarı azaldıkça arttığı görülmüştür. Bitüm/atık kil karışımlarında atık kil miktarı arttıkça çekme dayanımı artmıştır. Bitüm/atık kil/atık lastik karışımlarının çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, sabit bitüm miktarında, atık kil miktarı azaltılarak atık lastik miktarı artırıldıkça çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiş, bitüm/atık kil/bentonit karışımlarında ise bu durumun tam tersi ortaya çıkmıştır. Sabit bitüm miktarında, atık miktarı azaltılarak bentonit miktarı artırıldıkça çekme dayanımı azalmaktadır. Bu nedenle geomembran yapımında atık kil ile bentoniti bir arada kullanmanın çekme dayanımı açısından uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Malzemelerin uzama miktarları karşılaştırıldığında ise en yüksek uzama miktarlarının bitüm/atık kil/bentonit karışımlarına ait olduğu görülmüştür. Karışımdaki bentonit miktarı azaldıkça uzama miktarının da arttığı görülmektedir. Bitüm/atık kil/atık lastik karışımlarında ise bu durum tam tersi şekildedir: karışımdaki atık lastik miktarı azaldıkça uzama miktarı da azalmaktadır.

**Polyester keçe taşıyıcılı** geomembranların çekme dayanımı ve uzama analizleri sonuçlarına incelendiğinde, sonuçların taşıyıcısız karışımların analiz sonuçlarını destekler nitelikte olduğu saptanmıştır. En yüksek çekme dayanımı PK-BTM40CW60 (Polyester Keçe, %40 Bitüm, %60 Atık Kil) numunesine ait olup sonuç 3,37 MPa'dır. En yüksek uzama değeri ise %68 ile PK-BTM30CW70 (Polyester Keçe, %30 Bitüm, %70 Atık Kil) ve PK-BTM50CW50 (Polyester Keçe, %50 Bitüm, %50 Atık Kil) numunelerinde elde edilmiştir. Ticari geomembran örneği ile karşılaştırıldığında, polyester keçe taşıyıcılı tüm numunelerin çekme dayanımı değerleri daha yüksek; uzama değerleri ise yüksek olmamasına rağmen ticari geomembrana oldukça yakındır. **Ticari geomembrana en yakın sonuçlar, bitüm/atık kil karışım grubunda elde edilmiştir.**

**Cam elyaf tülü taşıyıcılı** geomembranların uzama ve çekme dayanımları incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımının 4,73 MPa ile CT-BTM40CW60 (Cam Tülü, %40 Bitüm, %60 Atık Kil) numunesinde, en yüksek uzama değerinin ise %8 ile CT-BTM40CW52BNT8 (Cam Tülü, %40 Bitüm, %52 Atık Kil, %8 Bentonit) numunesinde elde edildiği belirlenmiştir. CT-BTM40CW50TW10 (Cam Tülü, %40 Bitüm, %50 Atık Kil, %10 Atık Lastik) hariç tüm cam elyaf tülü

taşıyıcılı numunelerin çekme dayanımı değerleri ticari geomembrana göre yüksektir. Bununla birlikte, uzama değerleri %5-8 aralığında değişmiş, ticari geomembran örneğinin uzama değerinin çok altında kalmıştır.

**Çekme dayanımı ve uzama analizleri sonuçları göz önüne alınarak, geomembran üretiminde kullanılacak taşıyıcının polyester keçe olmasına karar verilmiştir.** Tüm karışımların analiz sonuçlarının uygun değerlerde olması nedeniyle hidrolik iletkenlik analizi, bitüm/atık kil, bitüm/atık kil/atık lastik ve bitüm/atık kil/bentonit karışımlarının her birinin kendi grubunda en yüksek atık kil ihtiva eden numuneye uygulanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 5.14’de verilmiştir.

**Çizelge 5.14.** Hidrolik iletkenlik analizleri sonuçları

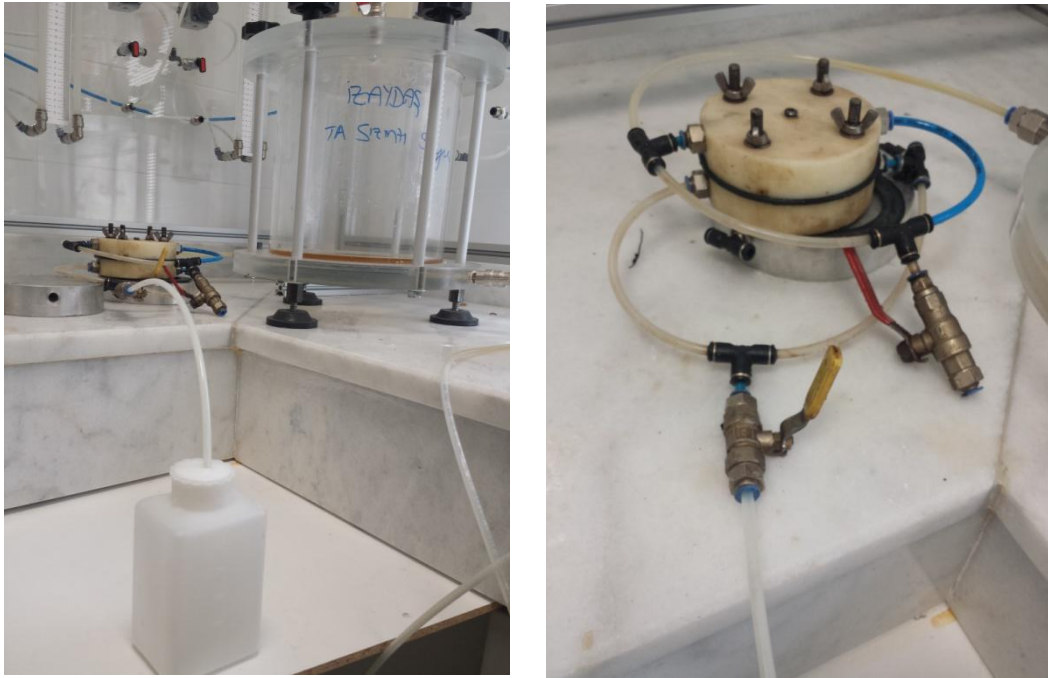
| Numune Kodu*  | Hidrolik iletkenlik ( $m^3/m^2/gün$ ) |
|---|---------------------------------------|
| PK-BTM30CW70  | $3.6 \times 10^{-6}$                  |
| PK-BTM40CW55TW5   | $1.0 \times 10^{-5}$                  |
| PK-BTM40CW55BNT5  | $2.2 \times 10^{-5}$                  |
| Ticari geomembran   | $<10^{-6} m^3/m^2/gün$                |
| *BTM30CW70: %30 Bitüm %70 Kil; BTM40CW55TW5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Atık Lastik; BTM40CW55BNT5: %40 Bitüm %55 Kil %5 Bentonit<br>**PK-: Polyester keçe taşıyıcılı |                                       |

Bir geomembran numunesinin hidrolik iletkenlik bakımından uygun olduğuna karar verilebilmesi için, iletkenlik değerinin  $10^{-6} m^3/m^2/gün$ ’den küçük olması gerekmektedir. Standardın bu koşuluna en yakın sonuca sahip olan numune PK-BTM30CW70 (Polyester keçe, %30 Bitüm, %70 Atık Kil) olduğundan, sızıntı suyu çalışmalarına yalnızca bu numune ile devam edilmiştir.

### 5.3. Sızıntı Suyu Çalışmaları

Çalışmada kullanılan kentsel katı atık DDT sızıntı suyu numuneleri Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Düzenli Depolama Tesisi’nden, tehlikeli atık DDT sızıntı suyu numuneleri ise İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) Tehlikeli Atık Depolama Tesisi’nden temin edilmiştir. Sızıntı suyu çalışmaları, üretilen en uygun malzeme olduğu belirlenen PK-BTM30CW70 (Polyester keçe, %30 Bitüm, %70 Atık Kil) ile yürütülmüştür.

Sızıntı suyu çalışmaları, 113Y122 no'lu TÜBİTAK projesi ekibi tarafından tasarlanan ve Anadolu Üniversitesi Atölyeler Müdürlüğü tarafından üretilen deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.22). Deney düzeneği, içerisinde 1 bar basınç altında sızıntı suyunun depolandığı, üzeri kapalı pleksiglas üç hazne, her bir pleksiglas hazne için, iki kapak arasında PK-BTM30CW70 (Polyester keçe, %30 Bitüm, %70 Atık Kil) geomembran numunesi sıkıştırılmış birer adet mold ve bu moldların çıkışında geomembrandan geçen sızıntı suyunu toplamak üzere bağlanmış birer adet plastik numune şişesinden oluşmaktadır. Deney süresince numune şişelerine toplanması beklenen sızıntı suyu örneklerinin çıkış karakterizasyonlarının belirlenmesi planlanmış fakat geomembrandan sızıntı suyu geçmemiştir. Bu nedenle sızıntı suyu çalışması, 35 gün süren deney sonunda numunelere SEM analizi yapılarak, geomembrandaki yapısal değişimin incelenmesi ile son bulmuştur.



Şekil 5.22. Sızıntı suyu deney düzeneği ve geomembranın yerleştirildiği mold

### 5.3.1. Sızıntı sularının başlangıç karakterizasyonlarının belirlenmesi

Tezde kullanılan kentsel katı atık ve tehlikeli atık DDT sızıntı suyu numunelerinde, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'te belirtilen parametreler olan pH, elektriksel iletkenlik, ICP-MS ile As (Arsenik), Ba (Baryum), Cd (Kadmiyum), Cu (Bakır), Hg (Cıva), Mo (Molibden), Ni (Nikel), Pb(Kurşun), Sb (Antimon), Se(Selenyum), Zn (Çinko), Cr toplam (Toplam krom), bulanıklık, askıda katı madde (AKM), toplam çözünen katı (TÇK), klorür, florür ve sülfat tayinleri yapılmıştır.

**pH Tayini:** Bu analiz, **TS 3263 ISO 10523** standardına göre kalibre edilmiş bir pH ölçer kullanılarak, 50 mL'lik numunenin pH değeri ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm 3 kez tekrarlanarak ortalama değer kaydedilmiştir.

**Elektriksel İletkenlik Tayini:** Bu analiz, **SM 2510-B** standardına göre kalibre edilmiş bir iletkenlik ölçer kullanılarak, 50 mL'lik numunenin iletkenlik değeri ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm 3 kez tekrarlanarak ortalama değeri kaydedilmiştir.

**ICP-MS ile Metal Analizi:** Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler ve Süreçler Laboratuvarı'nda bulunan ICP-MS/MS (Agilent 8800) cihazı ile **EPA 200.8** standardına göre gerçekleştirilen analiz, 150 mL'lik numune mavi filtre kağıdı ile 3 kez süzüldükten sonra cihaza beslenerek yapılmış ve numune içerisindeki arsenik (As), baryum (Ba), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), cıva (Hg), molibden (Mo), nikel (Ni), kurşun (Pb), antimon (Sb), selenyum (Se) ve çinko (Zn) miktarları belirlenmiştir.

Toplam krom tayini içinse, 100 mL numuneye 1 mL HCl ve 2 mL HNO<sub>3</sub> eklenerek hacim 20 mL'e düşene dek kaynatmadan ısıtılmış ve 20 mL hacmindeki kalan sıvı süzülerek, 50 mL'lik balon jojeye dökülmüş ve saf su ile tamamlanarak ICP-MS cihazına beslenmiştir.

**Bulanıklık Tayini:** Bu analizde, **SM 2130-B** standardına göre, numune türbidimetre örnek şişesine doldurulup şişenin dışında parmak izi kalmayacak şekilde silindikten sonra, şişenin türbidimetreye yerleştirilerek ölçüm alınması şeklinde yapılmıştır. Bu işlem 3 kez tekrarlanmış ve ortalama değer kaydedilmiştir.

**Askıda Katı Madde Tayini:** Analizde, **TS 7094 EN 872** standardına göre, sabit tartıma getirilen filtre kağıdının ağırlığı kaydedildikten sonra 50 mL'lik numune bu filtre kağıdından süzölmüş ve filtre kağıdı tekrar etüvde kurutulup tartılmıştır. Son ve ilk ağırlık arasındaki fark kullanılarak askıda katı madde miktarı hesaplanmıştır.

**Toplam Çözönen Katı Tayini:** Bu analizde, **TS 4111:1984** standardına göre, sabit tartıma getirilen behere 50 mL süzölmüş sızıntı suyu numunesi dökölmüş ve etüvde tamamen buharlaşana dek bekletilerek tartılmıştır. Son ve ilk ağırlık arasındaki fark kullanılarak toplam çözönen katı madde miktarı hesaplanmıştır.

**Klorür Tayini:** Analiz, **SM 4500-Cl--C** standardına göre, standardizasyonu yapılmış güçlü civa nitrat titrantı kullanılarak sızıntı suyu numunesin titre edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

**Florür Tayini:** Analizde, **SM 4500-F-D** standardına göre, hazırlanan belirli derişim aralığında standart florür çözeltilerinin absorbands değerleri yardımıyla standart eğri hazırlanmış, daha sonra sızıntı suyu numunesinin absorbandsı ölçölerek ve bu standart eğri kullanılarak, numunedeki florür miktarına ulaşılmıştır.

**Sülfat Tayini:** Analizde **SM 4500-SO-24-E** standardına göre, hazırlanan belirli derişim aralığında standart sülfat çözeltilerinin absorbands değerleri yardımıyla standart eğri hazırlanmış, daha sonra sızıntı suyu numunesinin absorbandsı ölçölerek ve bu standart eğri kullanılarak, numunedeki sülfat miktarına ulaşılmıştır.

### **5.3.2. En uygun geomembran karışımının sızıntı suyu geçişi sonrası yapısal durumunun belirlenmesi**

Sızıntı suyu çalışmaları sonlandırıldığında, saf su, kentsel katı atık DDT sızıntı suyu ve tehlikeli atık DDT sızıntı sularına maruz bırakılmış numuneler moldlardan çıkartılmıştır. Numunelerin moldlardan çıkartılması sırasında, deney süresince geomembran üzerinde etki eden basınç nedeniyle malzemenin, moldun alt kapağına güçlü bir şekilde yapıştığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.23).

SEM analizi, geomembranın kuru hali ile sızıntı suyu çalışmaları sonunda alınan numunelerin basınç nedeniyle şeklen zarar görmeyen kısımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. 300X, 500X ve 1000X yakınlaştırma değerlerinde SEM analizleri yapılmış ve bu sayede geomembrandaki yapısal değişim incelenmiştir.



Şekil 5.23. Geomembranın molddan çıkartılması

### 5.3.3. Bulgular ve değerlendirme

Sızıntı suyu çalışmalarından önce, KÜKAB (Kütahya Katı Atık Birliği) ve İZAYDAŞ (İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.)'dan alınan sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonları yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.15'de sunulmuştur.

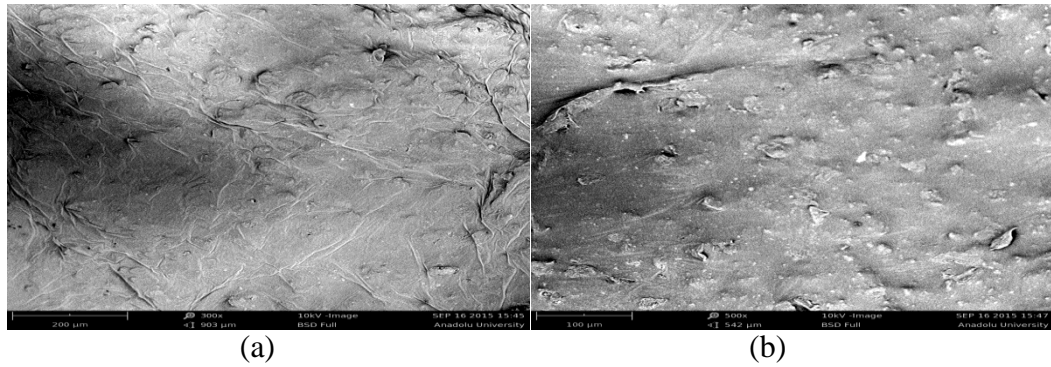
**Sızıntı suyu çalışmaları**, 35 gün sürdürülmüş ve bu süre içinde sızıntı sularının geomembran tabakadan sızarak numune toplama şişelerinde birikmesi beklenmiştir. Toplanan çıkış sularında, başlangıç karakterizasyonlarının belirlenmesinde kullanılan analizler uygulanarak, çıkış karakterizasyonlarının da aynı şekilde belirlenmesi ve oluşabilecek farklılıkların incelenmesi planlanmış; fakat sızıntı suları, üretilen geomembranın çok düşük olan hidrolik iletkenlik özelliği nedeniyle geçiş yapamamıştır. Bu nedenle, sızıntı sularının çıkış karakterizasyonları, tez çalışmasında planlandığı şekilde gerçekleştirilememiş olsa da varılan sonuç, geçirimsiz geomembran malzeme üretiminin başarılı şekilde gerçekleştirildiği yönündedir.

**Çizelge 5.15.** Sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonu

| Analiz adı                  | KÜKAB  | İZAYDAŞ |
|-----------------------------|--------|---------|
| pH                          | 8,36   | 6,87    |
| Elektriksel İletkenlik (mS) | 25,77  | 9,52    |
| Bulanıklık (NTU)            | 158    | 6,29    |
| Askıda Katı Madde (mg/L)    | 169    | 111     |
| Toplam Çözünen Katı (mg/L)  | 10.803 | 8.150   |
| Klorür (Cl) (mg/L)          | 3.193  | 2.573   |
| Florür (F) (mg/L)           | 2,43   | 1,38    |
| Sülfat (SO4-2) (mg/L)       | 1.353  | 64,737  |
| Arsenik (As) (mg/L)         | 1,285  | 0,038   |
| Baryum (Ba) (mg/L)          | 0,634  | 1,554   |
| Kadmiyum (Cd) (mg/L)        | <0,001 | 0,002   |
| Toplam Krom (Cr) (mg/L)     | 0,358  | <0,001  |
| Bakır (Cu) (mg/L)           | 0,432  | 0,157   |
| Civa (Hg) (mg/L)            | 0,446  | 0,063   |
| Molibden (Mo) (mg/L)        | 0,276  | 0,943   |
| Nikel (Ni) (mg/L)           | 0,876  | 0,237   |
| Kurşun (Pb) (mg/L)          | 0,066  | 0,017   |
| Antimon (Sb) (mg/L)         | 0,150  | 0,043   |
| Selenyum (Se) (mg/L)        | <0,001 | <0,001  |
| Çinko (Zn) (mg/L)           | 0,081  | 2,025   |

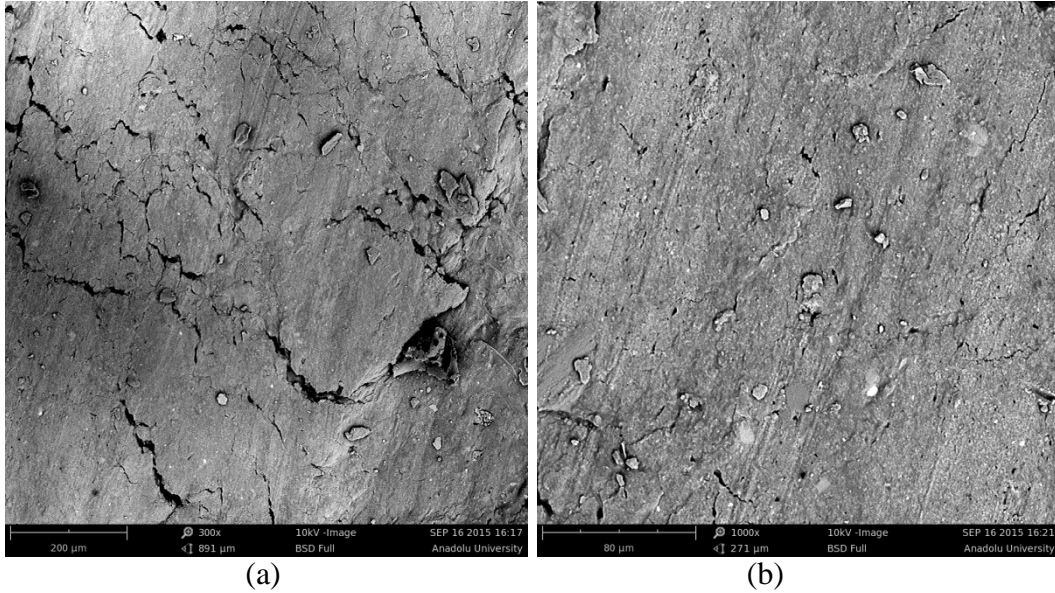
**SEM analizi**, üretilen geomembranın işlem görmemiş kuru hali ile saf su, kentsel katı atık DDT sızıntı suyu ve tehlikeli atık DDT sızıntı suyuna maruz bırakılmış örneklerine uygulanmıştır. Farklı yakınlaştırma değerlerinde alınmış SEM görüntülerinden uygun olanlar seçilerek karşılaştırılmıştır.

Geomembranın işlem görmemiş saf ve kuru halinin 300X ve 500X yakınlaştırılmış görüntülerinde (Şekil 5.24) herhangi bir çizik, delik veya boşluk içermeyen, düzgün bir yapı gözlenmektedir. 500X yakınlaştırmalı görüntüde, kil taneciklerinin yaklaşık 10-20 µm aralığında ve bitüm içinde homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.24.** Kuru halde PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü (a) 300X (b) 500X

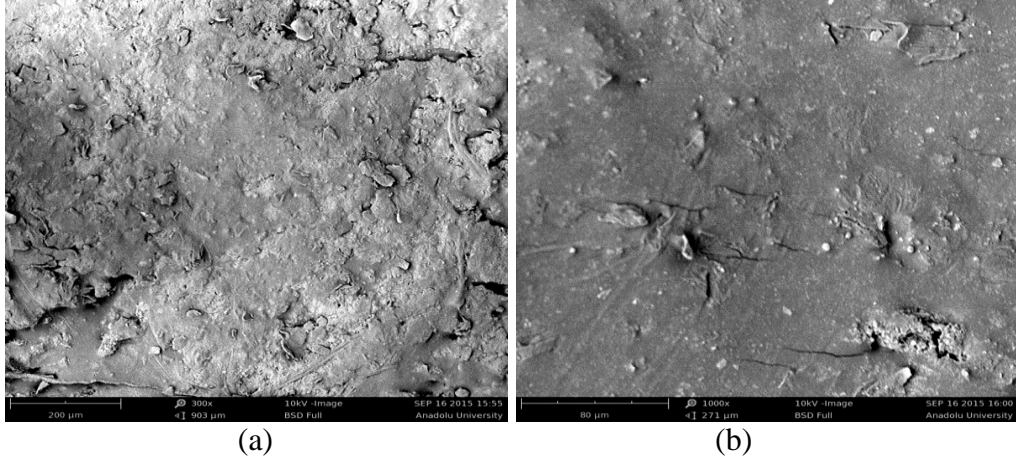
Saf suya maruz bırakılmış geomembranın 300X ve 1000X yakınlaştırılmış görüntüleri incelenerek (Şekil 5.25) bazı bölgelerde çatlamlar olduğu, bu çatlak ve çiziklerin maksimum 200 µm boyunda olduğu belirlenmiştir. 1000X yakınlaştırmalı görüntüde görüldüğü üzere, kil tanecikleri halen bitüm içinde homojen bir dağılıma sahip olmakla birlikte bir kısmı bitümden ayrılarak yüzeye ulaşmıştır. Bu durum, geomembranın hidrolik iletkenliğini etkilememiş, oluşan çatlak ve çiziklere rağmen sızıntı gerçekleşmemiştir. Oluşan düşük düzeydeki yapısal bozunma, geomembranın üst katmanı ile sınırlıdır; çekirdek katman olarak bilinen taşıyıcı malzemede ve geomembranın su ile temas etmemiş olan taban kaplamasında bir bozunma görülmemektedir.



Şekil 5.25. Saf suya maruz bırakılan PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü (a) 300X (b) 1000X

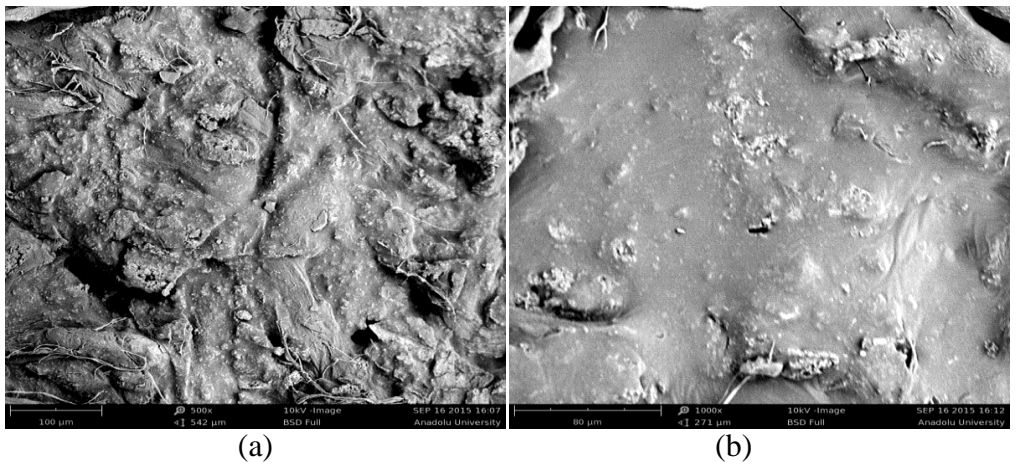
Kentsel katı atık DDT (KÜKAB) sızıntı suyuna maruz bırakılmış geomembranın 300X ve 1000X yakınlaştırılmış görüntüleri incelendiğinde, (Şekil 5.26) saf suya maruz bırakılmış geomembranda olduğu gibi, bazı bölgelerde oluşan ve çiziklerin maksimum 200 µm boyutunda olduğu belirlenmiştir. 1000X yakınlaştırmalı görüntü incelendiğinde, 10-20 µm aralığında delikler oluştuğu, yine de bir kısmı bitümden ayrılan kilin halen bitüm içinde homojen bir dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir. Geomembranın hidrolik iletkenliğini etkilemeyen bu duruma, geomembran sızıntı suyu ile temas ettiğinde bitümden ayrılan bir miktar kilden geriye kalan boşlukların sebep olduğu kanısına varılmıştır.





**Şekil 5.26.** KÜKAB sızıntı suyuna maruz kalan PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü (a) 300X  
(b) 1000X

Tehlikeli atık DDT (İZAYDAŞ) sızıntı suyuna maruz bırakılmış geomembranın 500X ve 1000X yakınlaştırılmış görüntülerinde, (Şekil 5.27) saf suya ve KÜKAB sızıntı suyuna maruz bırakılmış geomembranlarda olduğundan daha fazla delikli, bozunmuş bir görünüm elde edilmiştir. Bazı bölgelerde oluşan deliklerin maksimum 20-50 µm aralığında değiştiği belirlenmiştir. 1000X yakınlaştırmalı görüntüde, diğer sızıntı suyu çalışmalarına göre daha belirgin bir şekilde kil parçacıkları görülmektedir. Burada da geomembranın bitümden ayrılan bir miktar kilden geriye kalan boşlukların sebep olduğu bu durum, geomembranın hidrolik iletkenliğini etkilememiştir ve sızıntı görülmemiştir.



**Şekil 5.27.** İZAYDAŞ sızıntı suyuna maruz bırakılan PK-BTM30CW70'in SEM görüntüsü  
(a) 500X (b) 1000X

#### 5.4. Maliyet Hesaplaması

Laboratuvar mikseri ve çift vidalı ekstruder kullanılarak, % 30 Bitüm, % 70 Atık Kil içeren polyester keçe taşıyıcılı geomembran **PK-BTM30CW70**'in üretimi için maliyet analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar ticari bitümlü geomembran ile karşılaştırılmıştır. Üretilen geomembran için yapılan maliyet analizinde, hammaddelerin temini ile mikser ve ekstruder kullanımı sırasında tüketilen elektriğin maliyetleri esas alınmıştır.

1 m<sup>2</sup> **PK-BTM30CW70** üretimi için;

- 2,5 kg Bitüm (%30)-Atık Kil (%70) karışımı
  - 0,75 kg Bitüm
  - 1,75 kg Atık Kil
- 1 m<sup>2</sup> Polyester Keçe taşıyıcı gerekmektedir.

Atık Kil maliyeti 0 TL kabul edilmiştir. Diğer malzemeler için firmalardan alınan bilgilere göre;

- Bitüm maliyeti: 22.09.2015 itibariyle 0,649 TL/kg
- Polyester Keçe taşıyıcı maliyeti: 0,30 TL/m<sup>2</sup>

1 m<sup>2</sup> **PK-BTM30CW70** üretimi için;

$$\left(1,75 \frac{\text{kg Atık Kil}}{1 \text{ m}^2} \times 0 \frac{\text{TL}}{\text{kg Atık Kil}}\right) + \left(0,75 \frac{\text{kg Bitüm}}{1 \text{ m}^2} \times 0,649 \frac{\text{TL}}{\text{kg Bitüm}}\right) + \left(1 \frac{\text{m}^2 \text{ Taşıyıcı}}{1 \text{ m}^2} \times 0,30 \frac{\text{TL}}{\text{m}^2 \text{ Taşıyıcı}}\right) = \mathbf{0,787 \text{ TL/m}^2}$$

**hammadde maliyeti** oluşmaktadır.

1 m<sup>2</sup> geomembran üretimi için gerekli olan bitümlü sıcak karışım, mikserde 45 dakikada hazırlandıktan sonra ekstruderde 90 dakikada işlenerek son halini almaktadır. Tüketilen enerjinin maliyetini hesaplamak için elde edilen bilgilere göre;

- Laboratuvar mikserinin enerji tüketimi: 1,76 kW
- Ekstruderin enerji tüketimi: 9 kW
- Sanayide kullanılan elektriğin birim maliyeti: 01.07.2015 itibariyle 0,193 TL/kWh

1 m<sup>2</sup> **PK-BTM30CW70** üretimi için;

$$\left(0,75 \frac{\text{h}}{\text{m}^2} \times 1,76 \text{ kW} \times 0,193 \frac{\text{TL}}{\text{kWh}}\right) + \left(1,5 \frac{\text{h}}{\text{m}^2} \times 9 \text{ kW} \times 0,193 \frac{\text{TL}}{\text{kWh}}\right) = 2,860 \text{ TL/m}^2$$

**enerji tüketimi maliyeti** oluşmaktadır.

Hammadde ve enerji tüketimi maliyetleri toplanarak, 1 m<sup>2</sup>

**PK-BTM30CW70** üretiminin **toplam maliyeti**;

$$0,787 + 2,860 = 3,647 \text{ TL/m}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

Ticari olarak satılan, polyester taşıyıcılı bitümlü geomembranlar için tespit edilen fiyatlar Çizelge 5.16'da sunulmuştur. Araştırma sonucunda, üretilen geomembranın, ticari geomembranlardan daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni, ticari geomembranlarda bitümün çeşitli polimer katkıları ile modifiye edilmesi ve kullanılan dolgu malzemesi miktarının genellikle düşük tutulmasıdır.

**Çizelge 5.16.** Ticari geomembranlara ait fiyat bilgisi

| <b>Ticari Geomembran</b> | <b>Fiyat (m<sup>2</sup>)</b> |
|--------------------------|------------------------------|
| Elastobit                | 8,50 TL + KDV = 10,03 TL     |
| Elastoser 300-EP         | 6,30 TL + KDV = 7,43 TL      |
| PP3                      | 4 TL + KDV = 4,72 TL         |

## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Kırka Bor İşletmesi'nde ortaya çıkan atık kilin bitümlü geomembran üretiminde dolgu malzemesi yerine kullanılarak değerlendirilmesinin, atık yönetim hiyerarşisinde de önerildiği gibi, hem düzenli depolama sahalarına taşınan atık miktarını, hem de maden ocaklarından çıkartılan doğal dolgu malzemesi miktarını azaltarak çevresel avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

Tez çalışmasında, atık kilin fiziksel, kimyasal ve yapısal analizleri tamamlandıktan sonra, bitüm, atık kil, bentonit ve atık lastik kullanılarak oluşturulacak karışımların oranlarını belirlemek için deneme çalışmaları yapılmış, bitüm miktarının 1 kg'lık numunede % 30'dan daha düşük olamayacağı görülmüştür. Deneme süresi sonunda uygun görülen oranlarda karışımlar laboratuvar mikserinde karıştırılmış, sıcak karışımlar çift vidalı ekstrudere beslenerek (16mm; L/D:40), sabit kalınlık ve genişlikte, şeritler halinde geomembran malzemeler üretilmiştir. Ekstruderden çıkan bitümlü karışım numuneleri, henüz 1 rpm hız ile ilerleyen konveyör bant üzerindeyken, banttaki bitümlü karışım şeridinin yarısının üzerine taşıyıcı malzeme yerleştirilerek, diğer yarısı taşıyıcının üzerine katlanmış ve üzerine baskı uygulanarak geomembran oluşturulmuştur.

Polyester keçe ve cam elyaf tülü taşıyıcılar kullanılarak hazırlanan geomembran numuneleri, çekme dayanımı ile uzama değerleri göz önüne alınarak elenmiş ve seçilen üç numunede (**PK-BTM30CW70** (Polyester keçe, %30 Bitüm, %70 Atık Kil), **PK-BTM40CW55TW5** (Polyester keçe, %40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Atık Lastik) ve **PK-BTM40CW55B5** (Polyester keçe, %40 Bitüm, %55 Atık Kil, %5 Bentonit)) hidrolik iletkenlik analizi gerçekleştirilerek, en düşük hidrolik iletkenliğe sahip olan **PK-BTM30CW70 en uygun geomembran olarak seçilmiştir.**

**PK-BTM30CW70** ile gerçekleştirilen sızıntı suyu çalışmaları kapsamında, üretilen geomembran, saf su, kentsel katı atık depolama sahası ve tehlikeli atık depolama sahası sızıntı sularına maruz bırakılmıştır. Deney süresi boyunca geçirimsizlik özelliğini koruyan geomembrandan hiçbir su sızma yolu ile geçiş yapmamıştır. Deney sonlandırıldıktan sonra **SEM analizi** ile geomembranda

oluşan yapısal değişiklikler incelenmiştir. Üretilen geomembranın işlem görmemiş, saf halinde herhangi bir çizik, delik veya boşluk içermeyen; kilin homojen bir dağılım gösterdiği, düzgün bir yapı gözlenmekteyken; saf su, kentsel katı atık depolama sahası ve tehlikeli atık depolama sahası sızıntı sularına maruz bırakılan geomembranlarda sırasıyla giderek artan yapısal bozunmalar belirlenmiştir. Bununla birlikte, oluşan çizik, çatlak veya delikler hiçbir durumda hidrolik iletkenliği etkilememiş, herhangi bir sızıntı suyu çalışması sonucunda üretilen geomembrandan sızıntı suyu geçmemiştir.

Yapılan tüm analizlerin sonuçları ışığında, **PK-BTM30CW70** numunesinin sahip olduğu düşük hidrolik iletkenlik değeri ve hem kentsel hem de tehlikeli atık DDT sızıntı sularına maruz kaldıktan sonra uğradığı yapısal değişimin kabul edilebilir düzeyde olması nedeniyle, düzenli depolama sahalarında taban geçirimsizliğini sağlamak amacıyla kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Ülkemizde her yıl bor mineralleri üretimi sırasında ortaya çıkan 900.000 ton atık kilin, bitümlü geomembran endüstrisinde yoğunlukla dolgu malzemesi olarak kullanılan kalsit yerine kullanılarak değerlendirilebileceği bulgusu, tamamlanan maliyet analizi sonucunda, üretilen geomembranın ticari geomembrandan daha ekonomik olması ile de pekiştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

Abdelaal, F.B., Rowe, R.K. ve Islam, M.Z. (2014), "Effect of leachate composition on the long-term performance of a HDPE geomembrane," *Geotextiles and Geomembranes*, **42**, 348-362.

Ahlatçı, F., Erkan, İ. ve Alp, İ. (2012), "Balıkesir sındırgı bölgesi kaolenlerinden kuvarsın uzaklaştırılması," *15. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Ed: Şener, M. Ve Çiflikli, M.), Niğde Üniversitesi Yayınları, Niğde, No:25, 287-298.

Akbulut, M.E. (2009), *Üçüncü bileşen şartlarında bor atık katkılı çimentonun özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

Akbulut, S. (2003), "Katı atık depo alanlarının geoteknik tasarımı," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **2**, 223-230.

Akbulut, S. ve Sağlamer, A. (1999), "Modern katı atık depolarında kullanılan şilte sistemleri," *2. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Adana, 349-361.

Akpınar, K. (2005), *Sepiyolit ve zeolit karışımlarının tehlikeli atık deponi alanı dizaynında kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Akyıldız, V. (2011), *Lastikten Türetilmiş Yakıt Pirolyzi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Alma, M.H. ve Acemioğlu, B. (2001), "Türkiye'nin bor kaynakları, kullanım yerleri ve orman ürünleri endüstrisi," *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, **2**, 62-72.

Arand, W. (2000), "Asphalt as material for the construction of landfills for domestic wastes," *2. Eurasphalt & Eurobitume Kongresi Bildiriler Kitabı*, İspanya.

Aras, E., Demir, G. ve Berkün, M. (2006), "Katı atıkların düzenli depolanması ve sızıntı sularının sızdırmazlığının sağlanması," *11. Zemin*

*Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 570-579.

Armağan, B. (2002), “Gelişmekte olan kentlerde katı atık sızıntı suyu yönetimi Şanlıurfa örneği,” *3. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 483-494.

Ay, İ. (2014), *Geosentetik malzemelerin demiryollarında kullanımı ve balast-alt balast tabaka kalınlıklarının azaltılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Banar, M., Özkan, A., Onay, Ö., Çokaygil, Z. ve Akyıldız, V. (2011) TÜBİTAK Projesi, *Atık Lastikten Türetilmiş Yakutların Pirolyzisi ve Katı Ürünün Karbon Siyahı Olarak Değerlendirilmesi*, Proje No: 108Y267.

Bannour, H., Barral, C. ve Foltz, N.T. (2013), “Flow rate in composite liners including GCLs and a bituminous geomembrane,” *3. Uluslararası Geoteknik Mühendisliği Kongresi*, Tunisia, 809-819.

Batar, T., Köksal, S. ve Yersel, E. (2009). “Atık bor, atık kâğıt ve perlit katkılı sıva malzemesinin üretimi ve karakterizasyonu,” *Ekoloji*, **72**, 45-53.

Bayrakci, E., Ulutaş, D., Cokaygil, Z., Ozkan, A., Guney, Y. ve Banar, M. (2014), “Farklı atıkların katı atık düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi,” *6. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildiriler Kitabı*, Van.

Bentli, T., Özdemir, O., Çeük, M.S. ve Ediz, N. (2002), “Bor atıkları ve değerlendirilme stratejileri,” *1. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Kütahya, 250-258.

Berger, W., Kalbe, U.ve Goebels, J., (2002), “Fabric studies on contaminated minerals layers in composite liners,” *Applied Clay Science*, **21**, 89–98.

Boncukçuoğlu, R., Kocakerim, M. M., Tosunoğlu, V. ve Yılmaz, M. T. (2002), “Utilization of trommel sieve waste as an additive in Portlandcement production,” *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 1, pp. 35–39,

Bor Sektör Raporu (2014), Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü.

Cao, W. (2007), "Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process," *Construction and Building Materials*, **21**, 1011-1015.

Chalermyanont, T., Arrykul, S. ve Charoenthaisong, N. (2008), "Transport of heavy metals and chemical compatibility of hydraulic conductivity of a compacted sand-bentonite mixture," *Songklanakarın Journal of Science & Technology*, **30**, 269-279.

Chapman, H. D. (1965), "Cation-exchange capacity," *Methods of soil analysis – Chemical and Microbiological Properties Agronomy*, **9**, 891–901.

Chen, Z., Gong, H., Zhang, M., Wu, W., Liu, Y. ve Feng, J. (2011), "Impact of using high-density polyethylene geomembrane layer as landfill intermediate cover on landfill gas extraction," *Waste Management*, **31**, 1059-1064.

Correia, N.S. ve Bueno, B.S. (2011) "Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties," *Geotextiles and Geomembranes*, **29**, 92-101.

Çırak, M. (2010), *Flocculation behavior of two different clay samples from Kırka tıncal deposit*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Davarcıoğlu, B., Gürel, A. ve Kayalı, R. (2005), "Orta Anadolu Bölgesi Niğde-Dikilitaş killerin FT-IR spektroskopisi ile incelenmesi," *12. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Ed: Yakupoğlu, T., Açlan, M., Köse, O.), Van, 63-72.

Demir, C. (2006), *Bor minerallerinin enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Demir, İ. ve Orhan, M. (2002), "Bor atıklarının yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi," *I. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Kütahya, 235-239.

Demirbilek, D. (2012), *Tunceli ili düzensiz katı atık depolama alanı zemin özellikleri ve sızıntı suyunun karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.



Donnet, J.B., Bansal, R.P. ve Wang, M.J. (1993), *Carbon black*, Science and Technology 2nd Ed., Marcel Dekker Inc., New York, A.B.D..

Ediz, N. ve Yurdakul, H. (2002), “Etibor Kırka Boraks İşletmesi DSM elek üstü atığının duvar kerosu bünyesinde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması,” *I. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Kütahya, 246-249.

Emrulloğlu, Ö. F. ve Emrulloğlu, C.B. (2004), “Etibor Kırka boraks atığının yer kerosu bünyesine etkisi,” *I. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Kütahya, 213-218.

Ewais, A.M.R. ve Rowe, R.K. (2014), “Effect of aging on the stress crack resistance of an HDPE geomembrane,” *Polymer Degradation and Stability*, **109**, 194-208.

Fallah, S. Ve Khodaii, A. (2015), “Reinforcing overlay to reduce reflection cracking; an experimental investigation,” *Geotextiles and Geomembranes*, **43**, 216-227.

Geçkil, A. (2013), *Öğütülmüş araç lastiğinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklık ve elastik özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Gleason, M., H., Daniel, D., E., Eykholt, G., R. (1997), “Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications,” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **123**, 438-45.

Gümüş, O.Y., Ünal, İ.H., Erol, Ö. ve Sarı, B. (2011), “Synthesis, characterization, and colloidal properties of polythiophene/borax conducting composite,” *Polymer Composites* **32**, 418-426.

Güngör, A. G., Sağlık, A. ve Çalışkol, A. (2009), “Yansıma çatlaklarının önlenmesinde ara tabakaların kullanılması,” *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara.

Hoor, A. ve Rowe, R.K. (2012), “Application of tire chips to reduce the temperature of secondary geomembranes in municipal solid waste landfills,” *Waste Management*, **32**, 901-911.

http 1: <http://www.iha.com.tr/haber-16-cop-tesisinden-270-bin-kisinin-elektrik-ihtiyaci-karsilaniyor-367640/>

http 2: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>

http 3: Balıkesir Üniversitesi, Bor Araştırma ve Uygulama Merkezi, <http://bor.balikesir.edu.tr/bor.html>

http 4: Eti Maden İşletmeleri, Yeni Atık Göleti ÇED Başvuru Dosyası, [http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Eti%20Maden%20Yeni%20Atik%20Bajaji%20CED%20Raporu\(2\).pdf](http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Eti%20Maden%20Yeni%20Atik%20Bajaji%20CED%20Raporu(2).pdf)

Jarrahian, K., Seiedi, O., Sheykhani, M., Vafaie Sefti, M. ve Ayotallahi, Sh. (2012), “Wettability alteration of carbonate rocks by surfactants: a mechanistic study,” *Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects* **410**, 1-10.

Jessberger, H.L., Soyöz, B., Manassero, M. ve Street, A. (1993), “Engineering waste disposal (geotechnics of landfill design and remedial works),” *Green’93-Çevre ve Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Bolton, Birleşik Krallık, 21-30.

Ji, J., Ge, Y., Balsam, W., Damuth, J.E. ve Chen, J. (2009), “Rapid identification of dolomite using a fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR): a fast method for identifying heinrich events in IODP site U1308,” *Marine Geology* **258**, 60-68.

Kalafatoğlu, İ. E. ve Örs, S. N. (2003), “21. yüzyılda bor teknolojileri ve uygulamaları,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **5**, 59-71.

Karacasu, M. ve Bilgiç, Ş. (2009), “Atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisi,” *ESOGÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **2**, 45-64.

Karasu, B., Kaya, G., ve Yurdakul, H. (2002) “Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantre ve türev atıklarının duvar karosu bünye özelliklerine etkisi,” *I. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, 224–228.

Kavas, T. ve Önce, G. (2002), “Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantratör atıklarının pres tuğla üretiminde ergitici eleman olarak kullanılabilirliği,” *I. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, 219-223.

Kavas, T. (2006), “Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick,” *Building and Environment*, **41**, 1779-1783.

Kıpçak, İ. (2004), *Recovery of boron from solid wastes of boron industry by solid-liquid extraction and utilization of the solid wastes in ceramic industry*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Koerner, G.R. ve Koerner, R.M. (2006), “Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills,” *Geotextiles and Geomembranes*, **24**, 72-77.

Kozulu, R. (2003), *Evaluation of etibor kırka borax tailing in wall tile glazes*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Kula, İ. (2000), *Bor endüstri atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kurama, S., Kara, A. ve Kurama, H. (2004), “The effect of boron waste in phase and microstructural development of a terracotta body during firing,” *Journal of European Ceramic Society*, **26**, 755-760,.

Kurama, S., Kara, A., ve Kurama, H. (2007), “Investigation of borax waste behaviour in tile production,” *Journal of the European Ceramic Society*, **3**, 1715–1720.

Kurtteveli, Y. (2006) *Bor atıklarının seramik endüstrisinde değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Maček, M., Mauko, A., Mladenovič, A., Majes, B. ve Petkovšek, A. (2013), “A comparison of methods used to characterize the soil specific surface area of clays,” *Applied Clay Science*, **83-84**, 144-152.

Mazzieri, F., Emidio, G.D., Fratolocchi, E., Sante, M.D. ve Pasqualini, E. (2013) “Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate,” *Geotextiles and Geomembranes*, **40**, 1-11.

McBean, E. A., Rovers, F.A. ve Farquhar, G.J. (1995), *Solid waste landfill engineering and design*, Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey, A.B.D..

Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M. Ve Rizzo, S. (2013), "A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures," *Waste Management*, **33**, 1906-1917.

Mergen, A., Demirhan, H., Bilen, M., Cebi, H., ve Gündüz, M. (2001), "Tinkalden Borik Asit Üretimi," *Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı (TUMAKS)*, Ankara, 145-152.

Needham, A.D., Smith, J.W.N. ve Gallgaher, E.M.G. (2006), "The service life of polyethylene geomembrane barriers," *Engineering Geology*, **85**, 82-90.

Nefso, E.K. ve Burns, S.E. (2007), "Comparison of the equilibrium sorption of five organic compounds to HDPE, PP and PVC geomembranes," *Geotextiles and Geomembranes*, **25**, 360-365.

Olgun, A., Erdogan, Y., Ayhan, Y. ve Zeybek, B. (2005), "Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste," *Ceramics International*, **1**, 153-158.

Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y. ve Zhang, Y. (2005), "Preparation and properties of styrene-butadiene-styrene copolymer/kaolinite clay compound and asphalt modified with the compound," *Polymer Degradation and Stability*, 309-317.

Park, E.H., Jeong, S.U., Jung, U.H., Kim, S.H., Lee, J., Nam, S.W., Lim, T.H., Park, Y.J. ve Yu, Y.H. (2004), "Recycling of sodium metaborate to borax," *International Journal of Hydrogen Energy* **32**, 2982-2987.

Qian, X., Koerner, R. M. ve Gray, D. H. (2002), *Geotechnical aspects of landfill design and construction*, Prentice-Hall Inc., Pearson Education, New Jersey, A.B.D..

Reddi, L.N. ve Inyang, H.I. (2000) *Geoenvironmental engineering principles and applications*, Marcel Dekker Inc. A.B.D..

Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C. ve Dondi, G. (2014), "Waste bleaching clays as fillers in hot bituminous mixtures," *Construction and Building Materials*, **73**, 320-325.

Sarikaya, Y., Önal, M., Alemdaroğlu, T. ve Bozdoğan, İ. (2001), "Smektitlerin Bazı Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi," *10. Ulusal Kil*

*Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Ed:Karakaya, M.Ç., ve Karakaya, N.), Konya, 11-17.

Scheirs, J. (2009), *A guide to polymeric geomembranes*, Wiley Series in Polymer Sciences, Wiley Publication, A.B.D.

Tahtasızoğlu, B. (2010), *Katı atık depolama alanlarının dizayn kriterlerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B. ve Sevinç, V. (2002) “Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi,” *I. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, 259–266.

Taşpolat, L., T., Zorluer, İ. ve Koyuncu, H. (2006), “Atık mermer tozunun geçirimsiz kil tabakalarda donma-çözölmeye etkisi,” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **2**, 11-16.

Tchbanoglous, G., Theisen, H. ve Vigil, S. (1993), *Integrated soil waste management: Engineering principles and management issues*, McGraw-Hill Inc., New York, A.B.D.

Tumluer, G. (2006), *Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Turabik, M. ve Kumbur, H. (2003), “Bazı Bazık Boyar Maddelerin Doğal ve Aktive Edilmiş Kil Üzerine Adsorpsiyonu ile Giderilmesi,” *V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*, Ankara.

Türkiye Belediyeler Birliği (2014), *Genel İstatistikler*  
<http://www.tbb.gov.tr/belediyelerimiz/istatistikler/genel-istatistikler/>

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2004), *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, Ankara.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2010), *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*, Ankara.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2010), *Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik*, Ankara.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2012), *Teknik Rapor: Ordu ili Katı Atık Sahaları Güncel Durum ve Alternatif Sahalar*, Ankara.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2015), *Atık Yönetimi Yönetmeliği*, Ankara.

Uğurlu, A. (2009), *Boraks üretiminde ortaya çıkan atık malzemenin çimento içerisinde puzolanik malzemeler ile birlikte kullanılmasının çimento üzerindeki etkileri*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ulutaş, D., Bayrakci, E., Cokaygil, Z., Ozkan, A., Guney, Y. ve Banar, M. (2014), "Geotechnical, chemical and structural characterization of waste clay from boron production," *ATINER 9. Uluslararası Çevre Kongresi Bildiriler Kitabı*, Atina, 6-15.

Ulutaş, D., Bayrakci, E., Cokaygil, Z., Ozkan, A., Guney, Y. ve Banar, M. (2014), "Geotechnical, chemical and structural characterization of waste clay from boron production," *Athens J. Tech. and Eng.* **3**, 171-179.

Uslu, T. ve Arol, A. I. (2004), "Use of boron waste as an additive in red bricks," *Waste Management*, **2**, 217-220.

Uzun, S., Önal, M., Üstünişik, G. ve Sarıkaya, Y. (2005), "Hekzilamin adsorpsiyonunun bir smektit mineralinin bazı fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisi," *12. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Ed: Yakupoğlu, T., Açlan, M., Köse, O.), Van, 163-170.

Xue, Q., Zhang, Q., Li, Z. Ve Xiao, K. (2013), "The tension and puncture properties of HDPE geomembrane under the corrosion of leachate," *Materials*, **6**, 4109-4121.

Varank, G. (2010), *Katı atık depo sahalarının geçirimsiz taban sistemlerinden kirletici geçişinin incelenmesi ve taban sistemlerinin rehabilitasyonu*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Varank, G., Demir, A., Top, S., Sekman, E., Akkaya, E., Yetilmezsoy, K. ve Bilgili, M.S. (2011), "Migration behavior of landfill leachate contaminants through alternative composite liners," *Science of the Total Environment*, **409**, 3183-3196.

Yalçın, T., İşçi, S., Ünlü, C.H., Atıcı, O. ve Güngör, N. (2001), “Bentonit-su sistemleri ile iyonik yüzey aktiflerin etkileşimi,” *10. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Ed:Karakaya, M.Ç., ve Karakaya, N.), Konya, 201-206.

Yıldız, Ş. (2006), “İSTAÇ A.Ş. Depolama Sahalarında Sızıntı Suyu Ve Depo Gazının Yönetimi,” *Katı Atıkların Düzenli Depolanması & Vahşi Depolama Sahalarının Rehabilitasyonu Eğitimi*, İstanbul.

Yılmaz, H.R. ve Eskişer, T. (2007) “Geosentetik ürünlerin geoteknik mühendisliği sorunlarının çözümünde kullanımı ve sağlanan faydalar,” *2.Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Adana, 433-447.

Young, A. (1976), *Tropical Soils and Soil Survey*, Cambridge University Press.

Yükselen, Y. Ve Kaya, A. (2006) “Farklı Mineralojideki Killerin Özgül Yüzey Alanının Belirlenmesi,” *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, **1**, 35-42.